

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Obrábění keramiky
Machining of Ceramic

Student: Jan Prokop
Vedoucí bakalářské práce: doc.Ing.Vladimír Vrba CSc.

Ostrava 2009



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Obrábění keramiky

Machining of Ceramic

Student: Jan Prokop
Studijní obor: 2303R002 – 70 Strojírenská technologie
Pracoviště: Katedra obrábění a montáže – 346

Zásady pro zpracování:

1. Obecná charakteristika problému.
2. Problematika obrábění keramických materiálů.
3. Návrh technologie pro zlepšení kvality povrchu keramických obrobků.
4. Diskuze experimentů.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Pokyny pro zpracování:

Rozsah práce: Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Seznam doporučené literatury:

VASILKO, K., NOVÁK-MARCINČIN, J., HAVRILA, M. *Výrobné inžinierstvo.* [/I] Prešov : Datapress Prešov, 2003, 424 s. ISBN 80-7099-995-0.

NESLUŠAN, M., TUREK, S., BRYCHTA, J., ČEP, R., TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní.* [/I] Žilina : EDIS Žilina, 2007, 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.

BRYCHTA, J., HAVRILA, M., JURKO, J., ZAJAC, J. *Top trendy v obrábaní, I. časť – Obrábané materiály.* Žilina : Media/ST, s.r.o., Žilina, 2006, 193 s. ISBN 80-968954-2-7.

ZAJAC, J., JURKO, J., ČEP, R. *Top trendy v obrábaní, II. časť – Nástrojové materiály.* [/I] Žilina : Media/ST, s.r.o., Žilina, 2006, 193 s. ISBN 80-968954-2-7.

VASILKO, K., HAVRILA, M., MARCINCIN-NOVÁK, J., MÁDL, J., ZAJAC, J. *Top trendy v obrábaní, III. časť – Technologie obrábění.* [/I] Žilina : Media/ST, s.r.o., Žilina, 2006, 214 s. ISBN 80-968954-2-7.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Vladimír Vrba CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 8. října 2008

Datum odevzdání bakalářské práce: Akademický rok 2008/2009



doc. Dr. Ing. Josef BRYCHTA
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim FARANA, CSc.
děkan

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

.....

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PROKOP, J. Obrábění keramiky. Ostrava: Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 48 s. Bakalářská práce, vedoucí Vrba, J.

Bakalářská práce se zabývá obráběním keramických materiálů. Zaměření je na obrábění daného materiálu a vliv parametrů obrábění a geometrie nástroje na dosaženou kvalitu povrchu obrobku. V úvodu se bakalářská práce zabývá právě používaným materiálem, poté se přechází k základním informacím o použitých nástrojích a také vysvětlením základních pojmů obrábění, charakteristika nástrojů a jednotlivých parametrů, se kterými se při obrábění můžeme setkat. Pomocí teoretické části byly určeny jednotlivé parametry pro obrábění a proveden experiment, ve kterém se testovalo, jaký vliv mají právě dané parametry na dosaženou kvalitu povrchu obrobku. Na základě vyhodnocení experimentu a diskuze, byly určeny výsledné parametry.

ANNOTATION OF BACHELOR WORK

PROKOP, J. Machining of Ceramic. Ostrava. Department of machining and montage, Faculty of mechanical VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 48 p. Bachelor work, head: Vrba, J.

This bachelor work is engaged in machining of ceramic materials. This bachelor work targets the machining ceramic materials and effect geometry of instrument and parameters machining to quality work surface. In introduction this bachelor work targets of the used ceramic material, after comes next to basic information about machining, comes next basic information about used instrument and describes parameters of machining which we can meet in this subject. By way of theoretic part was established individual parameters for machining and made experiment, where tested, which effect have project parameters to quality work surface. On the basis of analysed experiment and discussion was made final parameters.

Obsah

Úvod.....	1
1 Obecná charakteristika problému	2
1.1 Profil firmy CeramTec Czech Republic s.r.o.	2
1.2 Materiály vyráběné v CeramTec Czech Republic s.r.o.	3
1.3 Materiály používaných obráběcích nástrojů.....	5
1.3.1 Polykrystalický diamant.....	5
2 Problematika obrábění keramických materiálů	7
2.1 Základní pojmy a definice obrábění	7
2.1.1 Základní pojmy	7
2.1.2 Pohyby a rychlosti při obrábění	9
2.1.3 Geometrie břitu obráběcích nástrojů	10
2.2 Geometrie obráběcích nástrojů.....	11
2.2.1 Roviny v souřadnicových soustavách	12
2.2.2 Nástrojové a pracovní úhly řezné geometrie.....	14
2.2.3 Volba geometrických parametrů břitu	15
2.3 Tvorba třísky	17
2.3.1 Plastická deformace při ortogonálním řezání.....	17
2.3.2 Oblasti deformací	18
2.3.3 Tříska a objemový součinitel přechování.....	20
2.3.4 Nárustek a jeho vliv na řezný proces	22
2.4 Práce a teplo při obrábění	23
2.4.1 Vliv řezných podmínek na teplotu řezání	25
2.5 Opotřebení řezných nástrojů.....	26
2.5.1.1 Závislost opotřebení na čase.....	28
2.5.2 Trvanlivost břitu.....	28

2.5.3	Životnost obráběcího nástroje	29
2.5.4	Vliv řezných podmínek na trvanlivosti bříty	30
2.6	Technologie soustružení	31
3	Návrh technologie pro zlepšení kvality povrchu keramických obrobků	34
4	Diskuze experimentů	38
4.1	Závislost velikosti posuvu na kvalitě povrchu materiálu	38
4.2	Závislost velikosti řezné rychlosti na kvalitě povrchu materiálu	40
5	Technicko – ekonomické zhodnocení.....	43
	Literatura.....	46
	Seznam příloh	47
	PŘÍLOHA 1	47
	PŘÍLOHA 2	48

Použité symboly a jednotky

A	[J]	práce
A_α, A_α'		hlavní, resp. vedlejší pohyb nástroje
CVD		chemická metoda povlakování
D	[mm,m]	průměr obrobku nebo nástroje
F_C	[N]	řezná složka síly obrábění
HSC		vysokorychlostní obrábění
PKD		polykrystalický diamant
$P_{r, f, p, s, o, n}$		nástrojová rovina základní, boční, zadní, ostří, ortogonální a normální
$P_{re, fe, pe, se, oe}$		pracovní rovina základní, boční, zadní, ostří, ortogonální a normální
Ra	[μ m]	drsnost povrchu
S		hlavní ostří
SK		slinutý karbid
T	[min]	trvanlivost nástroje
a_p	[mm]	hloubka řezu
f	[mm/ot]	posuv na otáčku
h	[mm]	hloubka řezu
n	[ot]	otáčky obrobku nebo nástroje
t_{str}	[min]	strojní čas
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_f	[m/ot]	rychlost posuvu

$\alpha_{o, f, p, n}$	[°]	nástrojové úhly hřbetu v rovině ortogonální, boční, zadní a normální
$\alpha_{oe, fe, pe, ne}$	[°]	pracovní úhly hřbetu v rovině ortogonální, boční, zadní a normální
$\beta_{o, f, p, n}$	[°]	nástrojové úhly břitu v rovině ortogonální, boční, zadní a normální
$\beta_{oe, fe, pe, ne}$	[°]	pracovní úhly břitu v rovině ortogonální, boční, zadní a normální
$\delta_{o, f, p, n}$	[°]	nástrojové úhly řezu v rovině ortogonální, boční, zadní a normální
$\delta_{oe, fe, pe, ne}$	[°]	pracovní úhly řezu v rovině ortogonální, boční, zadní a normální
ε_r	[°]	nástrojový úhel špičky
$\gamma_{o, f, p, n}$	[°]	nástrojové úhly čela v rovině ortogonální, boční, zadní a normální
$\gamma_{oe, fe, pe, ne}$	[°]	pracovní úhly čela v rovině ortogonální, boční, zadní a normální
η	[°]	úhel řezného pohybu
φ	[°]	úhel posuvu
κ_r, κ_r'	[°]	nástrojový úhel nastavení, vedlejší úhel nastavení
λ_s	[°]	nástrojový úhel sklonu ostří
ψ_r	[°]	nástrojový doplňkový úhel nastavení

Úvod

Technologie obrábění patří přední místo mezi metodami strojírenské technologie (slévání, tváření za studena, tváření za tepla, svařování, povrchové úpravy, montážní práce), poněvadž v převážné míře zabezpečuje kvalitativní stránku strojírenských výrobků. Technologii obrábění lze považovat za nejstarší metodu, kterou člověk použil od počátku svého vývoje. Objevení a zdokonalení prvních nástrojů bylo předpokladem pro postupný rozvoj společenské výroby, pro růst osobních potřeb a pro další kulturní vývoj[1].

1 Obecná charakteristika problému

Tato práce se zabývá obráběním technické keramiky, která se od roku 1994 vyrábí také v šumperské firmě CeramTecCZ, s.r.o., která je dceřinou společností německé firmy CeramTec. Konkrétně se zabývá kvalitou obrobeného povrchu, v závislosti na parametrech obrábění a geometrii nástroje. Jak již bylo zmíněno, firma CeramTecCZ,s.r.o. se zabývá pouze keramickými materiály. Technická keramika zde prochází kompletním zpracováním, od přípravy směsí keramiky, vypalování až po její konečné úpravy. V této práci se budeme zabývat pouze obráběním daného materiálu.

1.1 Profil firmy CeramTec Czech Republic s.r.o.

CeramTec Czech Republic se sídlem v Šumperku je dceřinnou společností německé společnosti CeramTec AG a kořeny společnosti jsou integrální součástí globální historie technické keramiky. Tato historie zahrnuje více než 115 roků výroby. Jen několik málo společností v oblasti keramiky má tak silné základy. V průběhu své úspěšné historie docházelo k různým fúzím a převzetím firem, které zahrnovaly různé segmenty společnosti. Ve stručném shrnutí, mezi jiným American Lava, 3M, General Electric, Rosenthal, Hoechst, Cerasiv, SPK, Ceramaseal, AlSiMag, a Dynamit Nobel byly důležité milníky v různých odvětvích této úspěšné společnosti. Řešení pro materiály budoucnosti jsou založená na pilířích zkušeností, výzkumu a vývoje: obsáhlé zkušenosti ohledně možností a oblastí aplikace na jedné straně a neustálý výzkum a vývoj orientovaný na využití na druhé straně tvoří základnu. Společnosti koncernu CeramTec Group určují standardy v oblasti vysoce výkonných keramických materiálů. Dnes ještě více než dříve, je CeramTec průkopníkem koncepcí nových řešení pro stále širší a důmyslnější oblasti používání keramických materiálů. Každý den pracujeme na rozšíření fascinujícího světa vysoce výkonných keramických materiálů, aby zahrnoval nové aspekty. Recept pro úspěch, který nás přivedl na špičku vývoje: Neustálý vývoj nových materiálů, vysoká kvalita, soustředění na systémová řešení specifická pro zákazníky a poradenství ohledně aplikací založené na dialogu o celé provozní životnosti výrobků. Výroba ve společnosti CeramTec Czech Republic s.r.o. byla zahájena v roce 1994, když CeramTec přesunul výrobu technických výrobků na bázi karbidu křemíku (SiC). Od té doby byly SiC materiály neustále dále vyvíjeny. V současné době se vyrábí tři verze materiálu 6– infiltrovaný karbid křemíku, hrubozrnný a jemnozrnný (SiSiC – ROCAR SiG and ROCAR SiF) a slinovaný karbid křemíku (SSiC – ROCAR S1). Další materiály se nacházejí ve fázi vývoje. Výroba byla rozšířena o druhou výrobní linku pro

dokončování těsnících destiček pro sanitární techniku, která představuje jednu z největších evropských výrobních kapacit ve svém oboru. Těžiště výroby spočívá v broušení, leštění a výstupní kontrole těsnících destiček vyráběných z kysličníku hlinitého. Implementovaný systém řízení jakosti dle norem ISO 9001 vycházející z celofiremní politiky jakosti je certifikován německou společností TÜV Management service GmbH. V současné době probíhají přípravy na zavedení a certifikaci systému norem ČSN EN ISO 9001:2001.

1.2 Materiály vyráběné v CeramTec Czech Republic s.r.o. [9]

CeramTec Czech Republic, se sídlem v Šumperku, vyrábí dvě základní materiálové modifikace z karbidu křemíku (SiC):

- infiltrovaný (reaction-bonded) karbid křemíku – hrubozrnný SiSiC (Rocar[®] SiG), jemnozrnný (Rocar[®] SiF)
- slinovaný karbid křemíku – SSiC (Rocar[®] S1)

Oba materiály vynikají vysokou teplotní odolností, velmi nízkým koeficientem teplotní roztažnosti, velmi vysokou tvrdostí, otěruvzdorností, vysokou korozní odolností, nízkou měrnou hustotou, nepropustností pro plyny a kapaliny, výbornou tepelnou vodivostí, výbornými kluznými vlastnostmi a mezi keramickými materiály vysokou odolností vůči teplotním šokům. SiC výrobky zvyšují provozní životnost v porovnání s klasickými kovovými materiály a tak prodlužují intervaly údržby a snižují náklady na údržbu.

Oblasti aplikace:

SiSiC

SiSiC je klasickým materiálem s širokým spektrem uplatnění v aplikacích, kde nejsou vhodné levnější vyspělé materiály (kompozity, grafit, Al₂O₃- korund apod.). Chemická odolnost je omezena do pH = 10. Drsnost neobrobeného materiálu je pod 6,3.

SSiC

SSiC materiál má vyšší užitnou hodnotu, díky vyšší teplotní a chemické odolnosti (v celém rozsahu pH – dle chemické odolnosti). Výrobní náklady jsou vyšší než u SiSiC, proto nalezne uplatnění v nejnáročnějších aplikacích materiálů z karbidu křemíku. Drsnost neobrobeného materiálu je Ra 0,8 až 1,6.

Odolnost vůči korozi:

Hlavním kritériem je hodnota pH: Od hodnoty pH 10 už není SiSiC odolný vůči korozi, alkalická média napadají křemík.

Tab. 1.1 Charakteristické vlastnosti

Všeobecné vlastnosti	Jednotky	S SiC Rocar S1	SiSiC Rocar SiG, SiF
Hustota	g/cm ³	3,15	3,07
Absorpční schopnost	%	0	0
Plynová prostupnost	%	0	0
Mechanické vlastnosti			
Pevnost v ohybu	MPa		
200°C		410	340
1000°C		-	340
Pevnost v tlaku	MPa	3500	>3500
E-modul	GPa	430	340
Tvrdost	HV 10	2300	
	HV 0,2		1200(Si), 2700(SiC)
Pevnost v lomu K _{IC}	MPa m ^{1/2}	4,4	4,0
Weibull modul		>10	>14
Poissonova konstanta		0,17	0,17
Hrúbost Ra	µm	<0,04	0,02
Tepelné vlastnosti			
Tepelná vodivost	W/mK		
20 - 100°C		115	120
Koeficient tepelné roztažnosti	10 ⁻⁶ .K ⁻¹		
20 - 100°C		2,8	3,4
20 - 400°C		3,6	4,1
20 - 600°C		4,1	4,4
20 - 1000°C		4,6	4,9
Tepelná kapacita	J/gK		
cp 20 - 100°C		0,6	0,7
cp 1000°C		-	1,3
Dielektrická pevnost	KV/mm	-	-
Dielektrická konstanta (10 MHz)	eps	53,5 – 57,8	59 – 455
Součinitel diel. ztrát (10 MHz)		-	-
Max. použitelná teplota	°C		
Oxidující, redukující, neutrální		-	-
V interní atmosféře		1800	-
Bez nabíjení na vzduchu		1500	1350
Odolnost vůči kolísání teploty	°C	350	1100

1.3 Materiály používaných obráběcích nástrojů

Pro obrábění keramických materiálů je zde využíváno řezných nástrojů PKD (polykrystalický diamant), řezných nástrojů s povlakem CVD tlusté diamantové vrstvy a nástrojů s monokrystalickým diamantem při obrábění celé řady různých keramických materiálů.

1.3.1 Polykrystalický diamant [2]

Diamant je nejtvrdějším známým přírodním materiálem. Průmyslové diamanty jsou dnes dostupné v několika provedeních, v historickém pořadí : přírodní monokrystal, polykrystalický kompakt, syntetický monokrystal a fólie připravená aktivovanou chemickou depozicí z plynné fáze. Vedle vysoké tvrdosti, dané vazebnou energií kubické mřížky, mají diamanty výbornou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, dobrou tepelnou vodivost a nízký koeficient tření. K jejich nevýhodám patří křehkost, afinita k železným kovům a Ni slitinám a nízká pracovní teplota. Při ohřevu nad 700°C se v PKD objevují trhliny, v krajním případě může dojít k odpadnutí vrstvy PKD od SK podložky. Se vzrůstající teplotou je rovněž možná zpětná grafitizace diamantu.

Nástroje a vyměnitelné břitové destičky osazené polykrystalickým diamantem se používají pro soustružení, vrtání, vyvrtávání a frézování neželezných kovů a slití, jako např. hliník a jeho slitiny (AlSi), měď, mosaz, bronz, titan a jeho slitiny. Stále více jsou tyto nástroje nasazovány při obrábění keramických a plastických hmot s abrazivními plnidly, slinutých karbidů, grafitu, kamene, pryže, event. dalších kompozitních materiálů s abrazivní složkou. V dřevozpracujícím průmyslu jsou k opracování laminovaných dřevotřísek používány frézy a vrtáky osazené PKD.

Mimo oblast řezných materiálů se PKD používá do průvlatu jako pro tváření např. wolframových drátů, jako otěruvzdorné dotyky, čidla, atd. Důležitými oblastmi jeho použití jsou geologie a hornictví, kde je PKD osazován jako řezný element do vrtných korunek a dlát.

Při výrobě nástrojů a vyměnitelných břitových destiček osazených PKD je možno volit rozdílnou zrnitost diamantu v rozmezí 2 až 25μm a typ vazby (kov, keramika) podle požadované aplikace. Obecně platí pravidlo, že s jemnější zrnitostí je možné získat lepší drsnost obráběného povrchu – do určité míry ovšem klesá i celková životnost nástroje. Pro výše uvedené oblasti použití byly navrženy a v praxi odzkoušeny řezné podmínky – viz. tab.1.2.

Materiál	Rychlost [m/min]	Hloubka řezu [mm]	Posuv [mm/ot]	Dopor. rádius [mm]
Soustružení - plynulý řez				
Al, Cu a jejich slitiny	300 - 1000	do 10	0,05 - 0,5	0,2 – 0,8
Tvrzené um. Hmoty zpev. Vlákny	100 - 600	do 5	0,05 – 0,5	0,8 – 1,2
Keramické hmoty	80 - 300	do 2	do 0,2	0,4 – 1,2
Titanové slitiny	50 - 100	do 2	0,05 – 0,1	0,8 – 1,2
Přírodní brusný kámen	50 - 100	do 2	0,1 – 0,3	-
Slinutý karbid	10 - 30	do 10	0,1 – 0,2	-
Frézování - přerušovaný řez				
Al a Al slitiny	500 - 3000	do 5	0,1 – 0,5	0,4 – 1,2
Cu a Cu slitiny	200 - 1000	do 2	0,1 – 0,5	0,4 – 1,2
Dřevěné materiály a zpevněné umělé plochy	200 - 3000	1 -15	0,4 – 1,5	0,4 – 1,2

Tab. 1.2 Doporučené řezné podmínky pro nástroje VBD a osazené PKD

Přírodní diamant se vzhledem ke svému malému výskytu a vysoké ceně používá převážně při velmi přesném obrábění s vysokými požadavky na jakost povrchu, protože umožňuje přípravu poloměru ostří do velikosti 10 nm. Soustružením se dnes např. vyrábějí rozměrná tvarová hliníková zrcadla pro kosmické účely.

Dosud posledním komerčně dosazeným výrobkem jsou nástroje osazené 0,1 mm tlustou polykrystalickou diamantovou fólií, která je připravena tepelně aktivovaným CVD procesem z metanu a vodíku. Fólie se letují na karbidové těleso nástroje, např. stopkovou frézu malého průměru, brousí a lapují. Tzv. CVD diamant je obecně vhodný pro obrábění neželezných kovů a nekovových materiálů.

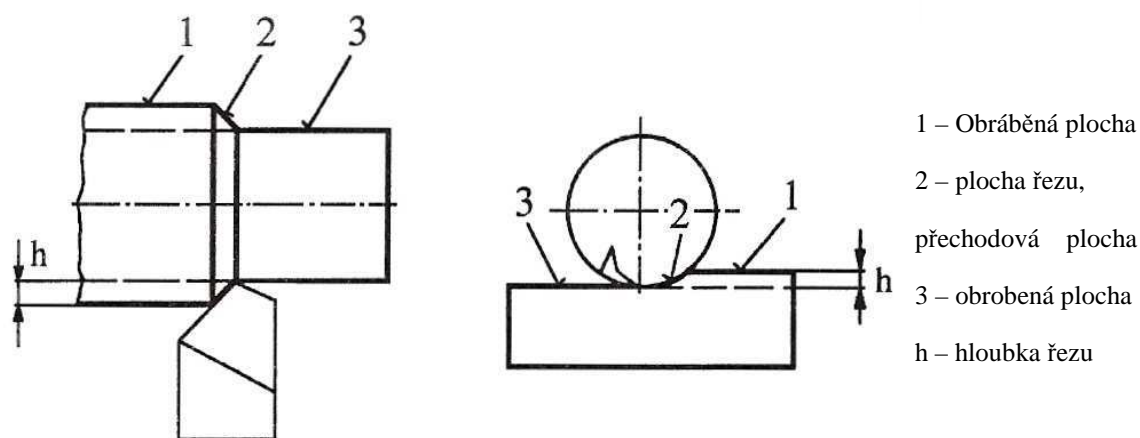
2 Problematika obrábění keramických materiálů

2.1 Základní pojmy a definice obrábění

2.1.1 Základní pojmy [2]

Obráběním nazýváme technologický proces, kterým vytváříme povrchy určitých tvarů, rozměrů a jakosti oddělováním částic nebo částí materiálu pochody mechanickými, elektrickými, chemickými, popř. jejich kombinací. Oddělování částic nebo částí materiálu tvaru třísky mechanickými pochody břitem obráběcího nástroje označujeme někdy jako řezání.

Obrobkem nazýváme obráběný nebo již obrobený předmět, součást, nebo dílec. Část povrchu obrobku odstraňovaná obráběním se nazývá **obráběná plocha** (viz obr. 2.3). **Obrobená plocha** je pak plocha obrobku vzniklá obráběním. Povrch obrobku vznikající těsně za břitem nástroje a tvořící přechod mezi obráběnou a obrobenou plochou nazýváme **plochou řezu**, nebo přechodovou plochou.



Obr. 2.1 Plochy na obrobku

Obráběcí nástroj je aktivním prvkem soustavy obrábění, který svými vlastnostmi bezprostředně umožňuje proces obrábění. Pokud toto obrábění zúžíme na řezání, pak někdy hovoříme o **řezném nástroji**.

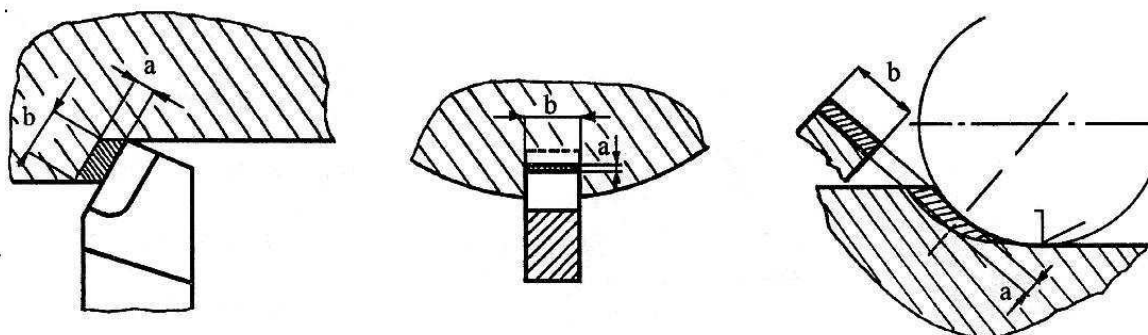
Břit nástroje je klínová část nástroje vnikající do obrobku.

Nominální povrch je tvar obrobeného povrchu obrobku bez mikronerovností a jiných úchylek.

Hloubkou řezu nazýváme vzdálenost mezi obráběnou a obrobenou plochou měřenou kolmo na obrobenou plochu. (viz obr.2.1)

Přídavek je vrstva materiálu mezi obráběnou a obrobenou plochou obrobku. Část přídavku přikloněná k ploše řezu a odebíraná jedním břitem je nazývána odřezávanou vrstvou, popř. řezem.

Tloušťka odřezávané vrstvy (řezu) a je tloušťka vrstvy měřená kolmo k ploše řezu v rovině kolmé na vektor rychlosti řezného pohybu (viz obr.2.2). **Šířka odřezávané vrstvy b** je šířka vrstvy měřená kolmo k tloušťce řezu. Je závislá na technologické operaci a geometrických parametrech řezné části nástroje a společně s tloušťkou odřezávané vrstvy určuje její průřez v rovině kolmé na vektor rychlosti řezného pohybu (obr.2.2) [2].



Obr.2.2 Průřez odřezávané vrstvy

Třísky je přetvořený materiál odřezávané vrstvy, kterou břit nástroje odebírá z obrobku. U třísky můžeme popsat tloušťky třísky a_1 a šířku třísky b_1 , které se však od tloušťky řezu a a šířky řezu b díky pěchování liší [3].

2.1.2 Pohyby a rychlosti při obrábění [2]

Řezný pohyb je relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem uskutečňující řezání. Může být přímočarý, šroubový, cykloidní apod.

Hlavní pohyb je složka řezného pohybu, která se shoduje s pohybem obráběcího stroje, který je odvozen od motoru s největším instalovaným příkonem. Je zpravidla rotační nebo přímočarý a koná jej buď nástroj nebo obrobek.

Posuvový pohyb je pohyb nástroje nebo obrobku, který spolu s hlavním pohybem umožňuje postupné oddělování třísek. Zpravidla se koná ve směru kolmém na směr hlavního pohybu (soustružení, hoblování, vrtání), případně ve směru hlavního pohybu (frézování obvodem) a to buď plynule, nebo přerušovaně.

Pomocný pohyb je pohyb kinematicky svázaný s hlavním pohybem umožňující vytvoření požadovaného obrobeného povrchu obrobku. Je to např. rotační pohyb obrobku kinematicky svázaný s rotačním hlavním pohybem odvalovací frézy na výrobu čelních evolventních ozubených kol apod.

Vedlejší pohyby jsou všechny ostatní pohyby nástroje a obrobku kromě hlavního, posuvného a pomocného pohybu. Jedná se např. o přísuv, krokování nástroje, dělení obrobku o rozteč apod.

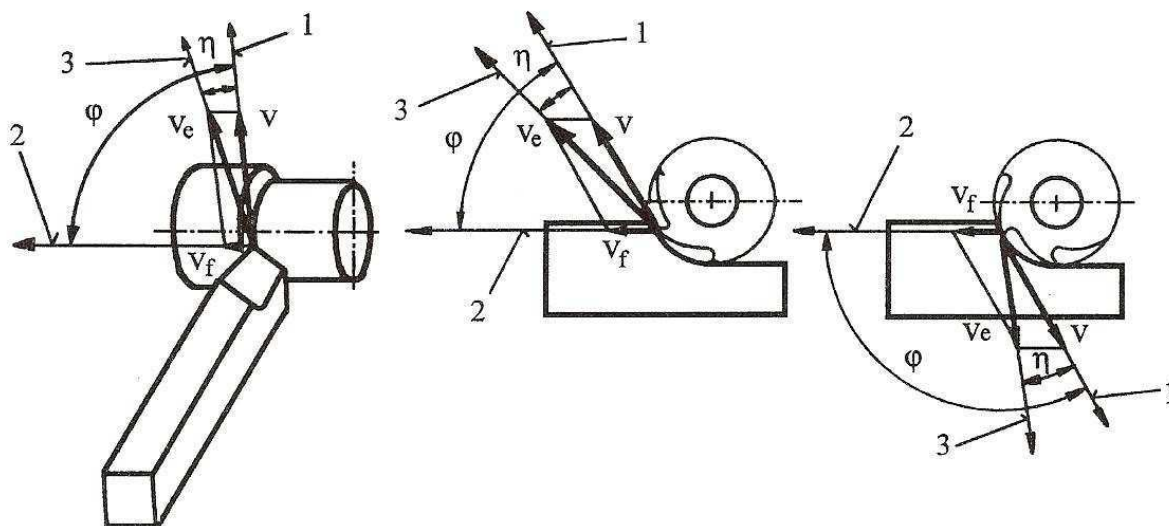
Řezná rychlost (v_c) je dána rychlostí řezného pohybu. U většiny metod obrábění ji lze se zanedbatelnou chybou uvažovat jako **rychlost hlavního pohybu (v , v_c)**. Udává se v m/min nebo v m/s a při rotačních pohybech se určuje ze vztahu: $v_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000}$, kde **D** je průměr obrobku nebo nástroje a **n** otáčky obrobku nebo nástroje.

Rychlost posuvu (v_f) je rychlost posuvového pohybu. Udává se různými způsoby:

- s_{min} [mm/min] je relativní posuv nástroje vůči obrobku za jednu minutu (frézování, NC stroje).
- s_{ot} [mm/ot] je relativní posuv nástroje vzhledem k obrobku za jednu otáčku nástroje (vrtání), nebo obrobku (soustružení, broušení mezi hroty).
- s_L [mm/pracovní zdvih] je relativní posuv nástroje vůči obrobku za jeden pracovní zdvih, resp. dvojzdvih (hoblování).

- s_z [mm/zub] je posuv, který relativně vykoná vícebřitý nástroj vzhledem k obrobku při úhlovém pootočení o jeden zub.

Úhel řezného pohybu (úhel výslednice řezné rychlosti) (η) je úhel mezi vektory rychlosti řezného a hlavního pohybu. **Úhel posuvu** (úhel posuvového pohybu) (φ) je úhel mezi vektorem posuvu a vektorem hlavního pohybu.



Obr.2.3 Pohyby při obrábění

Kde: v – rychlost hlavního pohybu v_f – posuvová rychlost
 v_e – řezná rychlost η – úhel řezného pohybu φ – úhel posuvu

2.1.3 Geometrie břitu obráběcích nástrojů

Aktivním prvkem procesu řezání je obráběcí nástroj. Uskutečňuje řezání tím, že svou pracovní částí tj. břitem vniká do materiálu obrobku a odděluje z něho postupně částice ve tvaru třísky. Řezný nástroj se skládá z těla, respektive tělesa nástroje a břitu [1].

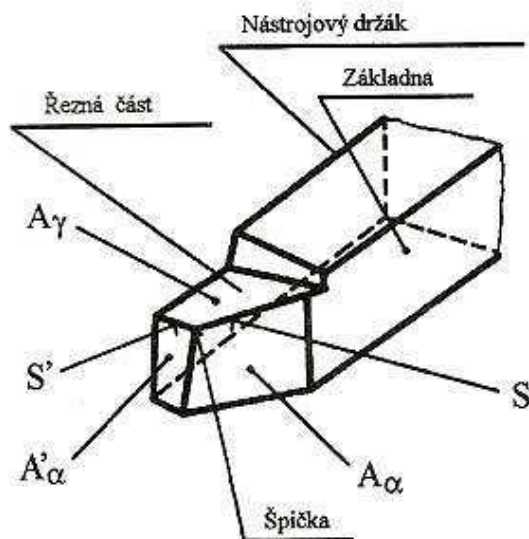
Čelo A_γ je plocha nebo více ploch břitu, po kterých odchází odebíraná tříska.

Břit je část nástroje tvořená čelem a hřbetem. Je to klínová část nástroje, která vniká do obrobku.

Hřbet je plocha nebo více ploch nástroje, které jsou přikloněny k řezné ploše a k obrobené ploše. **Hlavní hřbet A_α** je část hřbetu přikloněná k přechodové ploše, část hřbetu přikloněná k přechodové ploše je **vedlejší hřbet A'_α** .

Ostří je průsečnice čela a hřbetu.

Hlavní ostří S je část ostří, která začíná v bodě, kde úhel κ_r má nulovou hodnotu a koná obvykle řeznou práci. Vedlejší ostří S' je ostří vzniklé průnikem čela a vedlejšího hřbetu a začíná v bodě, v němž je vedlejší úhel nastavení κ_r' roven nule.



Obr.2.4 Základní části nástroje

2.2 Geometrie obráběcích nástrojů

Geometrie řezného nástroje má značný vliv na velikost síly řezání a její rozložení do jednotlivých složek, na utváření a odvod třísky, drsnost, přesnost a kvalitu výsledné obrobené plochy, trvanlivost břitu a hospodárnost obráběcího procesu.

Z uvedeného je zřejmé, že chceme-li při využívání nástroje minimalizovat ztráty, je při konstrukci nástroje a zejména jeho ostření nezbytná dokonalá znalost vhodné pracovní geometrie břitu a jejího vlivu na proces obrábění.

Nástrojové i geometrické parametry jsou charakterizovány pomocí úhlů, které jsou definovány v příslušných rovinách. Pro jednoznačnou identifikaci úhlů řezné části se definují dvě souřadnicové soustavy:

- **nástrojová** - v této rovině se definuje geometrie řezné části ve statickém pojetí. Uplatní se zejména při konstrukci, výrobě, kontrole a ostření nástroje. Roviny používané v této rovině se nazývají nástrojové roviny.

- **pracovní** - tato soustava se nazývá také jako *efektivní* nebo *kinetická*. Identifikuje se zde geometrie v procesu řezání. Roviny používané v této soustavě se nazývají pracovní roviny. Jejich názvy a značení je totožné jako u nástrojových rovin, s tím rozdílem, že se přidává index *e* (např. P_{re}). Rozdíl mezi oběma soustavami je dán velikostí úhlu η (obr.2.4) [2].

2.2.1 Roviny v souřadnicových soustavách [2]

Souřadnicové soustavy se umísťují do zvoleného bodu ostří, ve kterém nás geometrie zajímá. Jedná se o tzv. *uvažovaný bod ostří*. Na jednom nástroji je možno těchto bodů zvolit několik.

Roviny nástrojové souřadné soustavy jsou pro soustružnický nůž uvedeny na obr. 2.7.

Nástrojová rovina základní P_r je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na vektor rychlosti předpokládaného hlavního řezného pohybu v .

Nástrojová rovina boční P_f je rovina procházející uvažovaným bodem ostří v předpokládaném směru vektoru rychlosti hlavního pohybu (tedy kolmá na P_r) a posuvu v_f .

Nástrojová rovina zadní P_p je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, která je kolmá na nástrojovou rovinu základní P_r a na nástrojovou rovinu boční P_f . Tyto tři roviny tedy tvoří tzv. nástrojový souřadný systém.

Nástrojová rovina ostří P_s je rovina tečná k ostří v uvažovaném bodě ostří a kolmá na nástrojovou rovinu základní P_r .

Nástrojová rovina ortogonální P_o je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá jak na nástrojovou rovinu základní P_r , tak na nástrojovou rovinu ostří P_s . Tyto tři navzájem kolmé roviny tvoří tzv. ortogonální souřadný systém.

Rovina normální P_n je rovina kolmá k ostří S v uvažovaném bodě ostří.

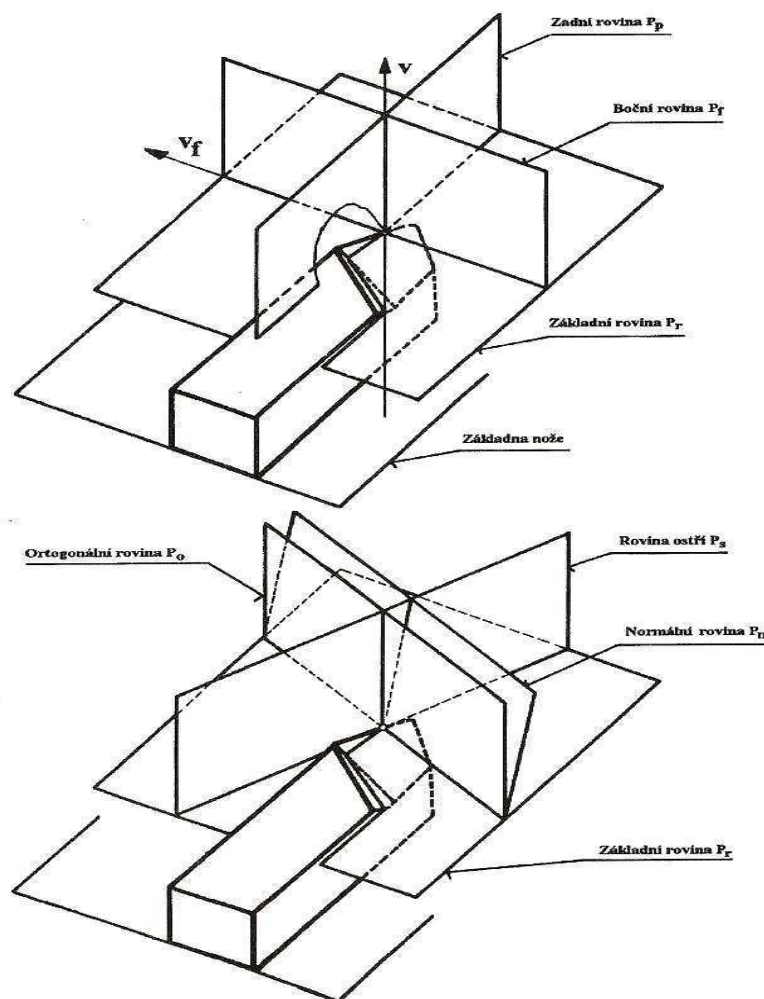
Pracovní rovina základní P_{re} je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na vektor rychlosti výsledného řezného pohybu v_c . Roviny P_r a P_{re} svírají úhel η .

Pracovní rovina boční P_{fe} je rovina procházející uvažovaným bodem ostří ve směru vektoru rychlosti hlavního pohybu a posuvu. V případě, že předpokládaný směr rychlosti hlavního pohybu a posuvu souhlasí se skutečnými směry rychlosti hlavního pohybu a posuvu, je rovina P_{fe} totožná s rovinou P_f .

Pracovní rovina zadní P_{pe} je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá k pracovní rovině základní P_{re} a pracovní rovině P_{fe} .

Pracovní roviny ostří P_{se} je rovina tečná k ostří v uvažovaném bodě ostří a kolmá na pracovní základní rovinu P_{re} . V této rovině leží vektor řezné rychlosti v_c .

Pracovní rovina ortogonální P_{oe} je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na pracovní základní rovinu P_{re} a na pracovní rovinu ostří P_{se} .



Obr. 2.5 Roviny nástrojové souřadnicové soustavy

2.2.2 Nástrojové a pracovní úhly řezné geometrie [2]

Úhly řezné geometrie se určují pomocí rovin v příslušných souřadnicových soustavách. Definice jsou pro nástrojovou a pracovní soustavu zcela analogické. K označení se vždy přidává index roviny, ve které je úhel měřen. Nástrojové a pracovní úhly se dají rozdělit do těchto skupin:

- Nástrojové a pracovní úhly polohy ostří:

Určují se v základní rovině P_r a označují se proto indexem r (resp. r_e). Patří sem úhly: κ_r – vedlejší úhel nastavení, ϵ_r – úhel špičky, ψ_r – doplňkový úhel nastavení, κ_r' – vedlejší úhel nastavení. Pro tyto úhly platí: $\kappa_r + \epsilon_r + \kappa_r' = 180^\circ$, $\kappa_r + \psi_r = 90^\circ$.

- Nástrojové a pracovní úhly čela, hřbetu, břitu a řezu:

Úhly čela v ortogonální, boční, zadní a normální rovině mají označení $\gamma_o + \gamma_f + \gamma_p$ a γ_n . Podobně úhly hřbetu α , břitu β a řezu δ . Ve všech rovinách platí $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$.

- Úhel sklonu ostří λ_s .

Tento úhel svírá ostří S se základní rovinou P_r v rovině ostří P_s . I zde hovoříme o kladné a záporné hodnotě úhlu λ_s . Kladných hodnot nabývá tehdy, je-li špička nejvyšším bodem ostří, záporných naopak je-li bodem nejnižším.

Tab.2.1 Definice jednotlivých nástrojových úhlů

		Určení	
		Úhel mezi rovinami	V rovině
Úhel nastavení	κ_r	$P_s - P_f$	P_r
Úhel nastavení vedl. ostří	κ_r'	$P_s' - P_f$	P_r
Doplňkový úhel nastavení	ψ_r	$P_s - P_p$	P_r
Úhel špičky	ε_r	$P_s - P_s'$	P_r
Ortogonální úhel čela	γ_o	$A_\gamma - P_r$	P_o
Boční úhel čela	γ_f	$A_\gamma - P_r$	P_f
Zadní úhel čela	γ_p	$A_\gamma - P_r$	P_p
Normální úhel čela	γ_n	$A_\gamma - P_r$	P_n
Ortogonální úhel hřbetu	α_o	$A_a - P_s$	P_o
Boční úhel hřbetu	α_s	$A_a - P_s$	P_f
Zadní úhel hřbetu	α_f	$A_a - P_s$	P_p
Normální úhel hřbetu	α_n	$A_a - P_s$	P_n
Ortogonální úhel bříty	β_o	$A_\gamma - A_a$	P_o
Boční úhel bříty	β_s	$A_\gamma - A_a$	P_f
Zadní úhel bříty	β_f	$A_\gamma - A_a$	P_p
Normální úhel bříty	β_n	$A_\gamma - A_a$	P_n
Ortogonální úhel řezu	δ_o	$A_\gamma - P_s$	P_o
Boční úhel řezu	δ_s	$A_\gamma - P_s$	P_f
Zadní úhel řezu	δ_f	$A_\gamma - P_s$	P_p
Normální úhel řezu	δ_n	$A_\gamma - P_s$	P_n
Úhel sklonu ostří	λ_s	$S - P_r$	P_s

2.2.3 Volba geometrických parametrů bříty

Při správné volbě geometrie nástroje lze výrazně ovlivnit pevnost bříty, trvanlivost nástroje, stabilitu procesu řezání, tepelné i silové zatížení, spotřebu vynaložené energie a splnit požadavky kladené na přesnost rozměrů i jakost obrobené plochy. Jednotlivé geometrické parametry ovlivňují řezný proces především následujícím způsobem.

Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří κ_r , jehož hodnoty se běžně pohybují v rozsahu $45^\circ - 90^\circ$, ovlivňuje zejména tvar třísky (tloušťku odřezávané vrstvy) a délku ostří v záběru, závisí na něm poměr složek síly řezání v nástrojové rovině základní P_r (poměr posunové a pasivní složky síly řezání). Vliv hodnoty úhlu se projevuje i

v tuhosti špičky nástroje a jejím opotřebení, což má v neposlední řadě vliv na drsnost obrobeného povrchu součásti.

Nástrojový úhel nastavení vedlejšího ostří κ_r' ovlivňuje především tuhost a opotřebení špičky s následným vlivem na drsnost povrchu obrobku.

Nástrojový úhel sklonu ostří λ_s zpravidla nabývá hodnoty -6° - $+6^\circ$, včetně nulové hodnoty a ovlivňuje především směr odchodu třísky z místa řezu (kladný úhel napomáhá odchodu třísky od obrobku a naopak) a tuhost špičky nástroje.

Nástrojový úhel čela γ (γ_0) se běžně volí od -8° - $+8^\circ$. Hodnota úhlu se projevuje na utváření třísek, poměry velikosti složek síly řezání i opotřebení nástroje. Současně s úhlem hřbetu působí i na tuhost a pevnost břitu nástroje.

Nástrojový úhel hřbetu α (α_0) je obvykle konstrukčně navrhován v rozmezí 8° - 12° . Hodnota úhlu ovlivňuje podmínky tření nástroje o obrobek, poměry velikosti složek síly řezání, vznik tepla zejména třením, tuhost břitu a trvanlivost nástroje.

Nástrojový úhel špičky ϵ_r je zpravidla zvolen v rozsahu od 0,2 mm do 5 mm. Platí zásada, že čím je vyšší poloměr špičky, tím je možno využít vyšší posuvové rychlosti nástroje při zvýšené trvanlivosti nástroje. Poloměr špičky výrazně ovlivňuje strukturu povrchu.

Hodnoty navržených úhlů břitu odpovídají:

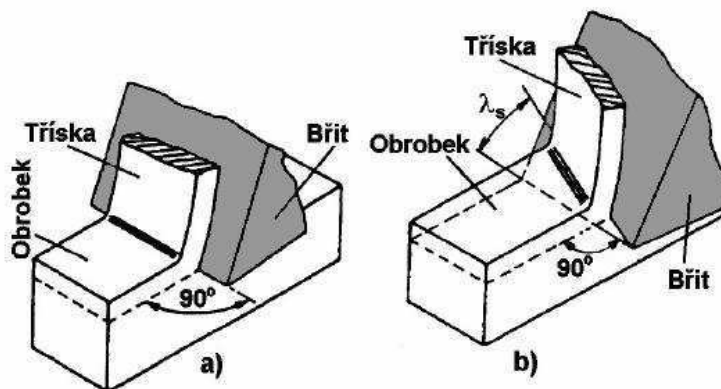
- fyzikální podstatě řezného procesu vzhledem k dané operaci a metodě obrábění
- druhu a materiálu obrobku, zejména z pohledu obrobitelnosti
- požadovaným mechanickým vlastnostem obrobku
- požadované struktuře povrchu
- požadovaným vlastnostem obrobené vrstvy
- řezným parametry
- silovému i tepelnému namáhání a zatížení
- fyzikálnímu stavu a materiálu břitu (řezivosti) aj.

Navrhnout ideální geometrii nástroje nelze. Volba je vždy jistým kompromisem mezi požadavky na snadné a energeticky výhodné obrábění a požadavky na dostatečnou tuhost, trvanlivost a výkon nástroje. Lze se jí však významně přiblížit.

2.3 Tvorba třísky [5]

Prioritním výstupem jsou parametry obrobené plochy. Při řezání působí obráběcí nástroj na obrobek a vyvolává v materiálu napětí, proti kterému klade materiál odpor. V důsledku toho se ustálí pole řezání, které má výrazné charakteristiky stavu napjatosti, teploty a deformace. Proces řezání se může realizovat jako ortogonální nebo obecné řezání.

V případě *ortogonálního řezání* je ostří nastaveno kolmo na směr řezného pohybu a daná problematika se řeší v rovině. Typickým příkladem ortogonálního řezání je zapichování, frézování nástrojem s přímými zuby, protahování apod. Schématicky je znázorněno na obr. 2.8 a). Při *obecném řezání* je třeba řešit řezný proces v prostoru (podélné soustružení, vrtání, frézování nástrojem se zuby ve šroubovici apod. Schéma je uvedeno na obr. 2.8 b).



Obr. 2.6 Realizace řezného procesu

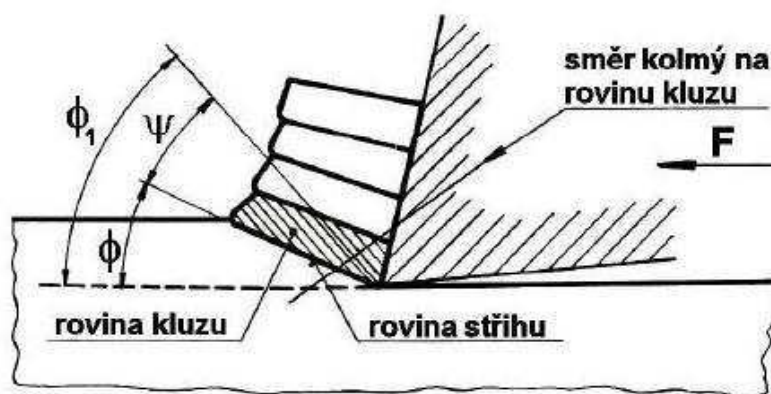
Mechanismus vzniku a oddělování třísky je různý u krystalických a nekrystalických látek. Většina technických materiálů běžně používaných ve strojírenské praxi jsou materiály krystalické. A právě teoretické a experimentální studie těchto materiálů se provádějí zejména pro případ ortogonálního řezání.

2.3.1 Plastická deformace při ortogonálním řezání [5]

Při řezném procesu dochází v oblasti tvoření třísky k pružným a následně k plastickým deformacím vlivem vnikání nástroje do materiálu obrobku. Břit nástroje je

tlačen do obrobku silou F . Napětíové pole v zóně řezání se rozkládá na napětíové pole v obrobku a nástroji. Pružné deformace jsou rozloženy do celého objemu obrobku, deformace plastické zahrnují jen zónu řezání. O rozložení napětí v zóně řezání je možné usuzovat z dostupných fotoelasticimetrických, případně jiných metod.

Smyková napětí rostou do té míry, než dojde k plastické deformaci materiálu obrobku před břitem nástroje (posuv vrstev v kluzných rovinách pod úhlem Φ_1). Pohyb nástroje pokračuje, roste plastická deformace a dochází k přechování a posunu vrstev materiálu ve směru kolmém ke kluzným rovinám. Oddělováním třísky se v podstatě ukončuje proces plastická deformace. Plastický lom nastává působením kluzné síly zatímco křehký lom působením síly normálové.



Obr.2.7 Vznik třísky

Při dalším pohybu nástroje roste napětí v materiálu až dosáhne vyšší hodnoty, než je mez stříhu obráběného materiálu a dojde k oddělení segmentu třísky pod úhlem stříhu Φ . Rozdíl mezi úhly ϕ_1 a ϕ se pohybuje v rozmezí $\psi = (0 \div 30)^\circ$, nízké hodnoty úhlu ψ vykazují tvárné materiály (např. ocel), vysoké hodnoty naopak materiály křehké (např. šedé litiny).

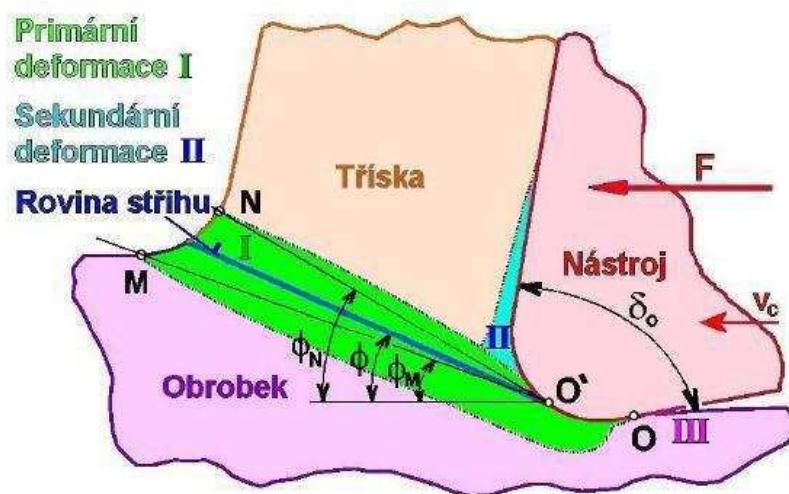
2.3.2 Oblasti deformací [5]

Při vnikání břitu nástroje do obráběného materiálu vznikají pružné a následně plastické deformace v těchto oblastech:

- před břitem nástroje, v oblasti primární plastické deformace, která se značí I a vymezuje body $OMNO'$

- v povrchových vrstvách styku třísky a čela nástroje je oblast sekundární plastické deformace, která je označena *II*
- v povrchové vrstvě obrobené plochy vzniká oblast terciární plastické deformace *III*

Velikost a tvar oblasti $OMNO'$ a stav napjatosti jsou proměnlivé a závisí zejména na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, především na jeho deformační a zpevňovací schopnosti. S rostoucí řeznou v_c , ale zejména posuvovou rychlostí v_f se tato oblast značně zužuje (ve vysokorychlostním resp. „HSC“ obrábění) a tím obě roviny téměř splývají. Rovněž záleží na řezném prostředí (chlazení), geometrii řezného nástroje a jemu předurčené kinematice (vzhledem k obrobku). Při zvětšování nástrojového úhlu čela γ_n klade nástroj menší odpor proti odchodu třísky, tříska tak odchází snadněji, a proto je méně deformována. Při zvětšování nástrojového úhlu κ_r se šířka třísky zmenšuje, což se projeví v poklesu velikosti koeficientu pěchování třísky, ale pouze do určité hodnoty tohoto úhlu. Při volbě optimálních řezných podmínek je nutno mít tyto zákonitosti na zřeteli.



Obr. 2.8 Oblasti plastických deformací

Plastická deformace obráběného materiálu v procesu řezání způsobuje:

- oddělení třísky od obrobku (oblast *I*)
- mechanické zatížení nástroje řeznými odpory
- tepelné zatížení nástroje
- opotřebení nástroje (na čele v důsledku *II*, na hřbetu v důsledku vlivu *III*)

- změnu textury materiálu v tříse i v povrchové vrstvě obrobené plochy
- vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobené plochy
- přechování třísky (průřez a délka třísky neodpovídají teoretickým hodnotám)

2.3.3 Tříska a objemový součinitel přechování [5]

Tříska je deformovaná odřezávaná vrstva materiálu z obrobku. Při vnikání řezného klínu do obráběného materiálu se tento materiál nejprve pružně a pak plasticky deformuje, čímž klade odpor (řezný odpor) proti vnikání řezného klínu. V rámci procesu řezání se utvářejí a následně oddělují třísky trhané (obr. 2.9), nebo stříhané (obr. 2.9). K oddělování trhaných třísek dochází za předpokladu, že platí:

$$\frac{\tau}{\sigma} < 1,$$

kde τ je tečné napětí a σ je normálové napětí. V případě, že normálová napětí σ převyšují tečná napětí τ , vzniká tříska trhaná (drobivá). Trhaná tříska se obvykle tvoří při obrábění tvrdých a křehkých materiálů. Vzniká vylamováním jednotlivých elementů nepravidelných tvarů bez vzájemné souvislosti. Tříska odchází ve tvaru nepravidelných úlomků, šupin, drobných elementů apod. Při tvorbě tohoto typu třísky můžeme očekávat kvalitativně horší obrobený povrch součásti.

V opačném případě, platí-li nerovnost:

$$\frac{\tau}{\sigma} > 1$$

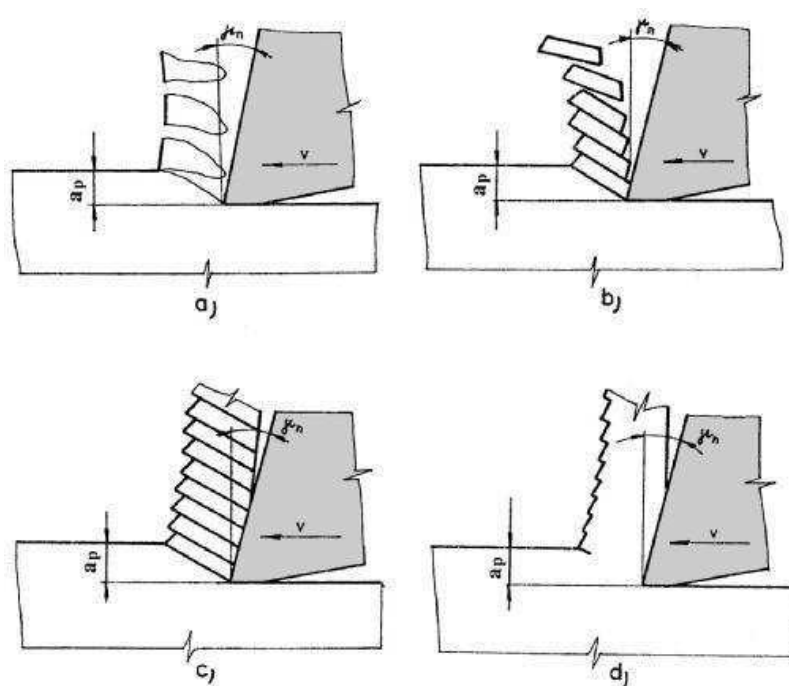
přičemž tečná napětí τ převyšují normálová napětí σ , je oddělovaná tříska stříhaná.

Podle stupně plastičnosti může být stříhaná tříska:

- **plynulá**, což je nejobvyklejší druh stříhané třísky (obr. 2.9 d). Tvoří se při obrábění tvárných materiálů. Jednotlivé elementy třísky mají velkou soudržnost a jsou od sebe těžko rozlišitelné. Povrch třísky na straně přivrácené k čelu nástroje bývá hladký. Plynulá tříska odchází po čele nástroje ve tvaru více či méně se svinujícího pásku (šroubovice) jako souvislý celek.
- **stupňovitá**, která se skládá z jednotlivých spolu spojených elementů, které se od sebe zřetelně liší svým tvarem i velikostí (podle obr. 2.9 c). Tříska tohoto typu vzniká

při obrábění tvrdých a tvárných materiálů. Při její tvorbě dochází k odstřížení jednotlivých částic, dobře patrných na vnějším povrchu třísky. Tyto částice jsou rozlišitelné i na straně přivrácené k čelu nástroje a lze je od sebe lehce oddělit. Tříska odchází po čele v kratších celcích, složených z jedné nebo více částic, ve tvaru různě tvarovaných pásků (šroubovice, kroužky, obloučky apod.).

- **elementová**, přičemž (dle obr. 2.9 b) lze pozorovat, že se tříska skládá z postupně odstřižnutých částic, které jsou od sebe snadno rozlišitelné.



Obr. 2.9 Oddělování třísek

Tříska, jako vedlejší doprovodný produkt procesu řezání, má mít určité vlastnosti z hlediska rozměrů a tvaru, a to z důvodu lepší manipulovatelnosti při odvodu ze stroje a další dopravy. Proto by měly zaujímat co nejmenší objem. Tvar třísky je důležitý také pro efektivní využití nástroje (dlouhá plynulá tříska se namotává na nástroj a zvyšuje nebezpečí poškození a dosažení požadovaných vlastností obrobeného povrchu. Proto je snaha dosáhnout vždy dělení třísky. Tvar vzniklé třísky závisí na řadě faktorů, z nichž nejdůležitějšími jsou:

- vlastnosti obráběného materiálu zejména z pohledu jeho obrobitelnosti
- geometrie nástroje a tvaru břitu (úhel čela γ , lamače, utvařeče třísek)

- materiálu nástroje (řezivost a vznikající tření)
- řezné podmínky (rychlost řezání v_c , posuv f)

Tvarování a lámání třísek má značný význam na „třískové hospodářství“, bezpečnost a plynulost práce u automatizovaných obráběcích strojů, zejména pak u bezobslužných obráběcích strojů a pracovišť. Jako kritérium vhodného tvaru třísky se používá tzv. objemový součinitel. Objemový součinitel třísek ω lze vyjádřit:

$$\omega = \frac{V_t}{V_m} [-], \text{ kde}$$

V_t představuje objem volně ložených třísek (například volně vložené do odměrného válce) [dm^3] a V_m představuje objem odebraného materiálu po stejnou dobu obrábění [dm^3].

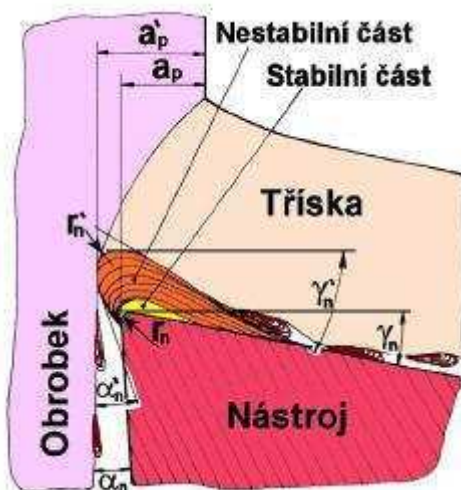
Dosažení specifikovaných požadavků na tvar a s tím související objem produkce třísek se zajišťuje především vhodnou volbou řezných parametrů a geometrie nástrojů se záměrem optimálního utváření třísek. Snížení hodnoty objemového součinitele třísek (násobek objemu třísky vzhledem k odebranému objemu materiálu z povrchu polotovaru) lze klasicky dosáhnout lámáním a utvářením třísek prostřednictvím různých lamačů a utvařečů třísek.

2.3.4 Nárůstek a jeho vliv na řezný proces [5]

Při realizaci řezného procesu za určitých řezných podmínek (v daném intervalu řezné rychlosti) se tvoří na čele nástroje spěchovaná tvrdá vrstva kovu, která ulpívá na břitu ostří, tzv. nárůstek. Nárůstek je silně spěchovaná vrstva obráběného materiálu, která má v důsledku probíhajících pochodů odlišnou strukturu a je charakterizována vysokou pevností a tvrdostí. Vytváří se periodicky. V závislosti na řezných podmínkách je tvoření a zanikání nárůstku periodickým procesem s frekvencí 10_2 až 10_3 Hz. Intenzita vzniku nárůstku je primárně dána řeznými podmínkami. Nárůstek má dvě části, a to stabilní a nestabilní (viz obr. 2.10). Převážnou část nárůstku odnáší tříska, menší část přilne na obrobenou plochu. Vzhledem ke svým vlastnostem může po určitou dobu přebírat funkci břitu a chránit tím řezný nástroj před jeho opotřebením. Tvorba nárůstku nejzávažněji ovlivňuje:

- mění geometrii nástroje (zvětšuje poloměr zaoblení ostří r_n , zvětšuje úhel čela γ a úhel hřbetu α , zmenšuje úhel řezu δ)

- mění skutečné rozměry obrobku v důsledek rozdílných hodnot požadované hloubky řezu a_p a výsledné hloubky řezu a_p' při vzniku nárůstku
- zhoršuje strukturu obrobené plochy (nestabilní část nárůstku ulpívá na obrobené ploše)
- způsobuje samobuzené kmitání soustavy stroj - nástroj – obrobek



Obr. 2.10 Tvorba nárůstku

Maximální rozměry tvorby nárůstku byly experimentálně zjištěny při nízkých rychlostech řezání od $v_c = 18 \div 25 \text{ m.min}^{-1}$. Vlastnosti obráběného materiálu a ostatní řezné podmínky včetně geometrie nástroje ovlivňují intenzitu tvoření nárůstku do té míry, do jaké ovlivňují výši teploty v místě řezu. Se zvětšujícím se posuvem roste velikost nárůstku, zatímco změna tloušťky obráběné vrstvy a_p (hloubky řezu) nevykazuje téměř žádný vliv. Při zmenšování úhlu čela γ se tvoření nárůstku posouvá do oblasti nižších řezných rychlostí. Zabránění vzniku nárůstku je možno provést vhodnou volbou řezných podmínek, zejména zvýšením rychlosti řezání, nebo také využitím vhodné procesní kapaliny, lapováním čelní plochy nástroje apod. S rostoucí pevností obráběného materiálu velikost nárůstku klesá. Proto se pro některé operace, jako je např. řezání závitů, výroba ozubení a protahování obráběný materiál zušlechťuje.

2.4 Práce a teplo při obrábění

Teplota řezání je jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících proces řezání a má vliv na všechny parametry řezání. Závisí na ní možnosti a vhodnost použití různých řezných rychlostí, posuvů, hloubky řezu a také ovlivňuje trvanlivost nástroje. Z výše

uvedených skutečností vyplývá, že teplota nepřímo, ale zásadně ovlivňuje produktivitu a ekonomičnost výroby. Je známo několik metod měření teploty řezání, teplotních polí atd. založených na různých fyzikálních jevech [5].

Práce vynaložená k odebrání třísky se prakticky veškerá mění v teplo. Velikost práce A , která se musí vynaložit k překonání řezného odporu při odebrání určitého množství třísek je výslednicí součtu jednotlivých složek práce:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 [100\%], \text{ kde}$$

A_1 je práce spotřebovaná na plastické deformace materiálu, která tvoří 40 až 60% A

A_2 je práce spotřebovaná třením vnějším a vnitřním tvořící 10 až 25% A

A_3 je práce spotřebovaná na pružnou deformaci, která představuje 5 až 20% A

A_4 je práce na vytvoření nových povrchů, která je velmi malá a lze ji tedy zanedbat

Vzniklé teplo velmi výrazně ovlivňuje řezný pochod, neboť působí na řezné vlastnosti nástroje, mění mechanické vlastnosti obráběného materiálu, ovlivňuje velikost tření, přechování, zpevnění, atd. Hlavními zdroji tepla jsou jednak plastické deformace a vnitřní tření materiálu, jednak na vnější tření, tj. tření na čele a na hřbetě obráběcího nástroje. Množství tepla vznikajícího při řezání se dá vyjádřit vztahem:

$$Q = A = F_c \times v_c [\text{J/s}], \text{ kde}$$

Q vyjadřuje v podstatě tepelný výkon.

Celkové množství tepla vznikajícího při obrábění za jednu minutu Q_c lze stanovit ze vztahu:

$$Q_c = F \times v_e \times t [\text{J}], \text{ kde}$$

F je výsledná síla obrábění [N]

v_e je rychlost výsledného řezného pohybu [m/min]

t je doba řezání [min]

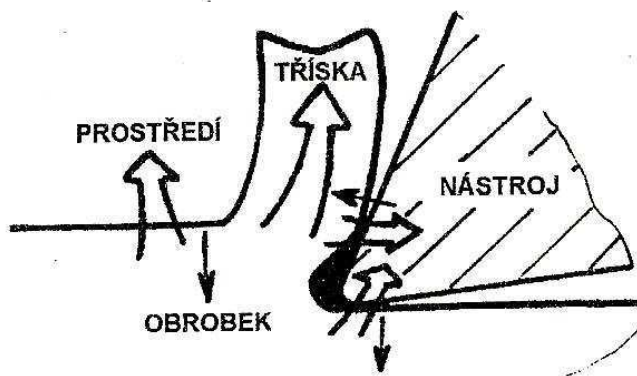
Množství tepla vzniklého při řezání se rozděluje nestejně, přechází do obrobku, do třísky a do nástroje. Rozdělení tepla závisí na příčinách tepelného jevu v místě jeho zdroje a každý zdroj tepla má svou bezprostřední oblast účinku. Zdroje

vzniku tepla při řezání lze schematicky rozdělit dle obrázku 2.14 do oblasti střižné plochy, na oblast čela nástroje a na oblast hřbetu nástroje.

V oblasti **střižné plochy** probíhá prvotní plastická deformace odebírané vrstvy, způsobené posouváním částic kovu. To je příčinou vzniku velkého množství tepla, které proudí převážně do třísky a je třískou odváděno. Menší část tohoto tepla proudí do obrobku a zanedbatelně malé množství tepla směřuje do okolí řezu.

Oblast **čela nástroje** z pohledu tepelných jevů ovlivňuje odcházející tříska po čele nástroje, které probíhá druhotná plastická deformace a tedy další příčina vzniku tepla. K tomuto teplu však ještě přistupuje teplo vzniklé třením třísky o čelo nástroje. Teplo z oblasti nástroje proudí hlavně do třísky a menší část do nástroje. Malé množství tepla z třísky směřuje do okolního prostředí.

V oblasti **hřbetu nástroje** je příčinou vzniku tepla tření a povrchová deformace řezné plochy v důsledku styku hřbetu nástroje s řeznou plochou. Z této oblasti proudí teplo převážně do obrobku a menší část tepla přechází do nástroje [1].



Obr.2.11 Vznik tepla při řezání

2.4.1 Vliv řezných podmínek na teplotu řezání [1]

Pro určování a hodnocení velikosti teploty řezání má velký význam průměrná teplota stykových ploch nástroje a obrobku. Na velikosti teploty stykových ploch mají velký vliv řezné podmínky a materiál obrobku.

Se zvyšováním řezné rychlosti klesá průměrný odpor, a tím i deformační teplo a teplota materiálu v oblasti prvotních deformací, zvětšuje se práce tření na čele v souvislosti s větší rychlostí pohybu třísky po čele nástroje. Z uvedeného tedy vyplývá, že se zvyšováním řezné rychlosti teplota řezání stoupá. Z počátku stoupá rychleji a

v oblasti vyšších řezných rychlostí stoupá pomaleji. Po dosažení určité řezné rychlosti se dosáhne maximální hodnoty teploty řezání, která se pak při dalším zvyšování řezné rychlosti již prakticky nemění. Naopak teplota obrobku se zvětšováním řezné rychlosti klesá, což se dá vysvětlit tím, že čas styku nástroje s obrobkem se při vyšších řezných rychlostech zmenšuje. Zvyšování řezných rychlostí působí tepelně velmi nepříznivě na břity nástrojů.

Zvětšováním posuvu a hloubky řezu teplota řezání rovněž stoupá. Vliv posuvu a hloubky řezu na zvyšování teploty řezání není tak výrazný, jako při zvyšování řezné rychlosti. To vyplývá ze skutečnosti, že rychlost pohybu třísky se mění se zvětšováním posuvu podstatně méně, než při zvyšování řezné rychlosti.

Hloubka řezu má na teplotu řezání podstatně menší vliv jak posuv, protože se zvětšuje délka řezné hrany v záběru, a tím i odvod tepla. Je tedy při konstantním průřezu třísky výhodnější tříska štíhlá než úzká a tlustá.

Vliv úhlu nastavení na teplotu řezání souvisí s vlivem šířky a tloušťky třísky. Při zvětšování úhlu nastavení se vzniklé teplo soustřeďuje na kratší úsek břitu a potom řezné plochy rostou.

Se zmenšováním úhlu čela teplota řezání stoupá. Tím vzrůstá velikost plastické deformace v odřezávané vrstvě a vzniká větší množství tepla. Současně ale vzrůstá průřez břitu, jímž se teplo odvádí z místa styku nástroje a obrobku.

Na teplotu řezání má vliv i úhel hřbetu a otupování nástroje na hřbetu. Při zmenšování úhlu hřbetu a při opotřebení hřbetu nástroje roste práce tření na hřbetě, což má za následek zvyšování teploty řezání. Při příliš velkém úhlu hřbetu se teplota řezání rovněž zvětší, protože se zhorší podmínky tepelného spádu a odvádění tepla nástrojem.

2.5 Opotřebení řezných nástrojů [5]

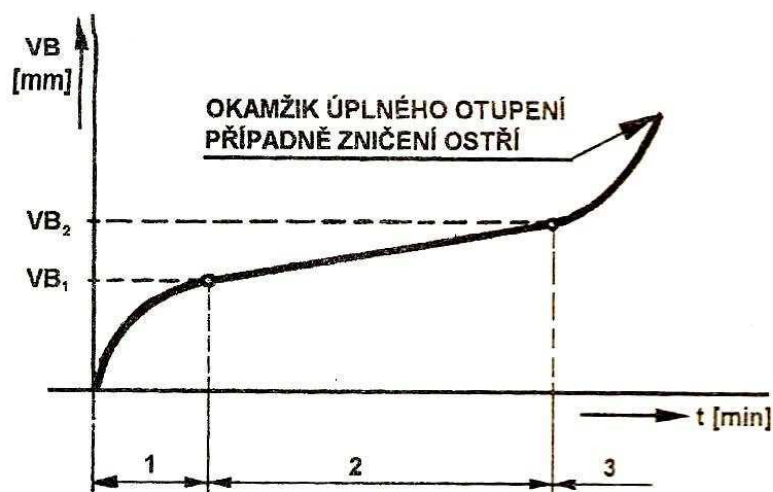
Při obrábění vzniká velké množství tepla, které se vyvíjí na ploše hřbetu a čela nástroje. Tepelná zatížení značně namáhají materiál břitu nástroje a v některých případech (např. při frézování) vytváří dynamický faktor, a to v okamžiku, kdy jeden břit z materiálu vystupuje a jiný do něj naopak vniká. Procesem utváření třísky, provázeném vysokým tlakem a teplotou se průběžně vytváří čistý kovový povrch, při kterém má obráběný materiál sklon k chemickým reakcím nebo k difúzním procesům. Většina obráběných materiálů obsahuje tvrdé částice různého druhu. Tyto částice

nežádka dosahují tvrdosti materiálu břitů nástroje. Dochází tak k abrazivnímu efektu. Kombinací výše uvedených mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů dochází ke složitému zatěžování břitů nástroje. Toto se pak projevuje opotřebováním nástroje. K základním mechanismům opotřebení patří zejména:

- abraze (brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje)
- adheze (vznik a okamžité následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů)
- difúze (migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak, a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje)
- oxidace (vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí)
- plastická deformace (důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase), která se může ve svém nejnejpříznivějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení
- křehký lom (důsledek vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenity a vměstky v obráběném materiálu, atd.)

Abraze a adheze jsou též obvykle označovány jako fyzikální mechanismy opotřebení, difúze a oxidace jako chemické, všechny působí v průběhu času plynule, s tím, že časový okamžik začátku jejich působení nemusí být vždy shodný. Plastická deformace a křehký lom jsou naproti tomu mechanismy, které působí náhle, v daném okamžiku a obvykle způsobí okamžité ukončení činnosti nástroje (náhlá změna tvaru břitů nástroje, lavinové opotřebení nebo ulomení špičky). Hřbet nástroje se opotřebává především v důsledku abraze a oxidace, čelo v důsledku adheze, difúze, abraze a oxidace. Na skutečnost, zda se nástroj bude více opotřebávat na hřbetě nebo na čele (příp. na špičce), mají výrazný vliv i další faktory, jako je např. geometrie nástroje, druh operace (hrubování, dokončování) a v neposlední řadě i řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, šířka záběru ostří, řezné prostředí). V podstatě lze proces obrábění sledovat tolika způsoby, kolik signálů o svém okamžitém stavu vysílá do svého okolí.

2.5.1.1 Závislost opotřebení na čase [1]



Obr. 2.12 Závislost opotřebení na čase

V oblasti 1 se opotřebení VB velmi rychle zvětšuje. Po dosažení určité hodnoty VB_1 zůstává intenzita růstu opotřebení v celé oblasti 2 nepatrně proměnná. V oblasti 2 narůstá opotřebení rovnoměrně. V oblasti 3 se hodnota opotřebení opět prudce zvyšuje, až do úplného otupení nebo zničení bříty.

Rozhodující vliv na intenzitu opotřebování nástroje má teplota řezání. Proto budou opotřebování nástrojů nejvíce ovlivňovat ty charakteristiky řezného procesu, na nichž teplota řezání závisí nejvíce, jsou to:

- řezná rychlost
- posuv
- hloubka řezu
- úhel čela

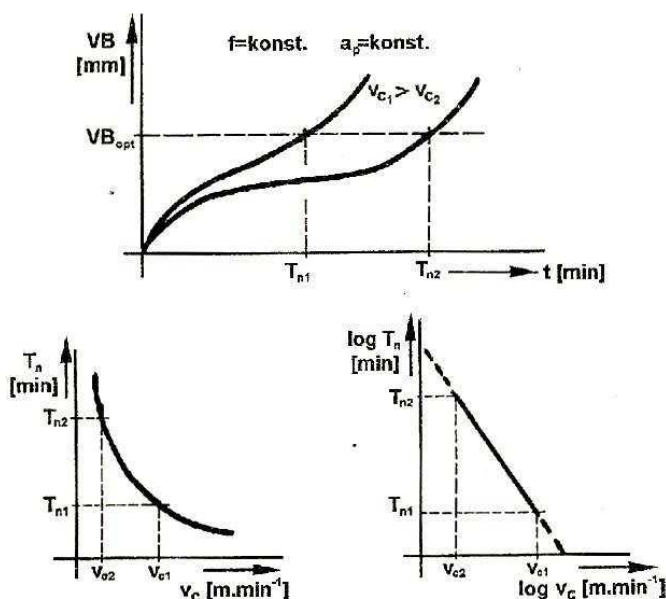
2.5.2 Trvanlivost bříty [1]

Trvanlivost bříty nástroje T_n je celková doba, po kterou je nástroj v záběru schopen odebírat třísku. Jinými slovy je to součet čistých řezných časů, tedy doba práce nástroje od naostření až do úplného otupení. Pro trvanlivost platí Taylorův vztah:

$$T_n \times v_c^m = c_T$$

Po vynesení hodnot řezných rychlostí a jim odpovídajících hodnot trvanlivostí do diagramu $T_n = f(v_c)$ v kartézských souřadnicích, lze získat exponenciální křivku, která má v logaritmických souřadnicích přímkový tvar, jak vyplývá z obr. 2.13. Hodnota exponentu m vyjadřuje citlivost řezného materiálu na řeznou rychlost. Je to záporná hodnota směrnice přímky:

$$m = -\operatorname{tg} \alpha$$



Obr. 2.13 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti

2.5.3 Životnost obráběcího nástroje [1]

Otupený nástroj po novém naostření může znovu pracovat. Počet přeostržení, která je možné do úplné spotřeby řezné části nástroje realizovat, udává životnost nástroje. Životnost obráběcího nástroje je dána součtem všech trvanlivostí břitu mezi jednotlivými ostřeními. Je tedy dána celkovou dobou práce obráběcího nástroje, respektive řezné destičky od prvního nasazení až do vyřazení. Životnost obráběcího nástroje lze tedy vyjádřit následovně:

a) pro celistvé nástroje

$$\check{Z} = (Z_0 + 1) \times T_n, \text{ kde}$$

Z_0 je počet možných přeostržení břitu, 1 značí nový nástroj

b) pro nástroje s výměnnými řeznými destičkami

$$\check{Z} = Z_b \times T_n \times s_b, \text{ kde}$$

Z_b je počet břitů na destičce

s_b je součinitel využití řezných destiček (břitů na destičce)

2.5.4 Vliv řezných podmínek na trvanlivosti břitu [1]

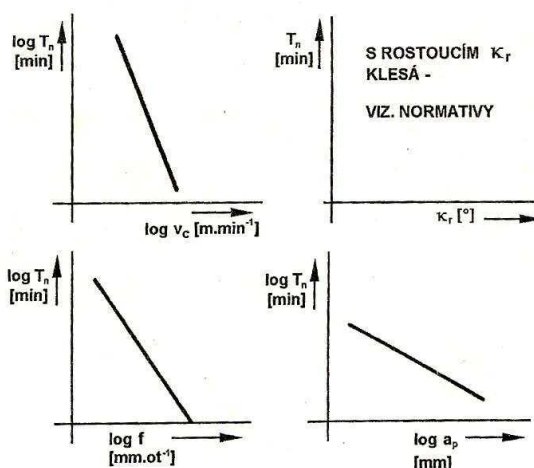
Trvanlivost břitu je na změnu řezné rychlosti velmi citlivá. U nástrojů z rychlořezné oceli je vyšší citlivost na změnu řezné rychlosti než u slinutých karbidů. Příčinu je nutné hledat ve vzrůstající teplotě v místě řezu. Při zvyšování řezné rychlosti trvanlivost břitu řezného nástroje klesá.

Na trvanlivosti břitu má ihned po řezné rychlosti velký vliv i posuv. Při zvyšování posuvu trvanlivost břitu rovněž prudce klesá.

Vliv hloubky řezu na trvanlivost břitu není tak výrazná, jak tomu bylo u řezné rychlosti a u posuvu. Trvanlivost břitu se zvyšující se hloubkou řezu rovněž klesá.

Při zmenšování úhlu čela trvanlivost břitu nejprve roste, dosahuje maxima okolo 15° a potom klesá. Plocha a hodnota maximální hodnoty trvanlivosti závisí na materiálu obrobku a nástroje.

Zmenšováním úhlu nastavení hlavního ostří se trvanlivost zvětšuje při zvyšování řezného odporu a při zvětšení sklonu ke chvění. Optimální hodnota nastavení dle experimentálního studia se pohybuje v rozmezí $\kappa_r = 45 - 60^\circ$.



Obr. 2.14 Vliv vybraných parametrů na trvanlivosti břitu

2.6 Technologie soustružení [1]

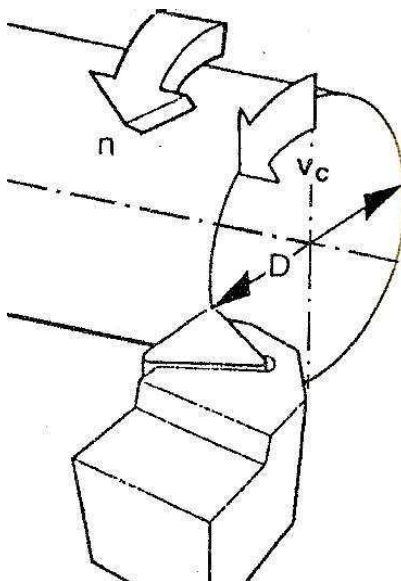
Hlavní pohyb při soustružení koná obrobek, posuvový pohyb nástroj. Nástroj se posouvá buď ve směru osy – podélný posuv, nebo ve směru kolmém na osu obrobku – příčný posuv. Při obrábění obecných tvarových ploch je dráhou pracovního pohybu všeobecná křivka. Různé tvary soustružených rotačních součástí je možné vyrobit různými způsoby soustružení. Podle toho, zda se obrábí na součástech plochy vnější a nebo vnitřní, hovoří se o soustružení vnějším a nebo vnitřním. Jednotlivé druhy vnějšího soustružení jsou následující:

- podélné soustružení pro výrobu válcových ploch
- čelní soustružení pro výrobu čelních rovinných ploch
- soustružení kuželových ploch
- soustružení tvarových ploch
- soustružení závitových ploch

Skutečná řezná rychlost je při soustružení rychlost hlavního řezného pohybu. V praxi se označuje jako řezná rychlost obvodová rychlost obrobku v místě soustružení a vypočítá se ze vztahu:

$$v_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad [\text{m/min}], \text{ kde}$$

v_c je řezná rychlost, D je průměr obrobku v místě soustružení, n je počet otáček pracovního vřetena.



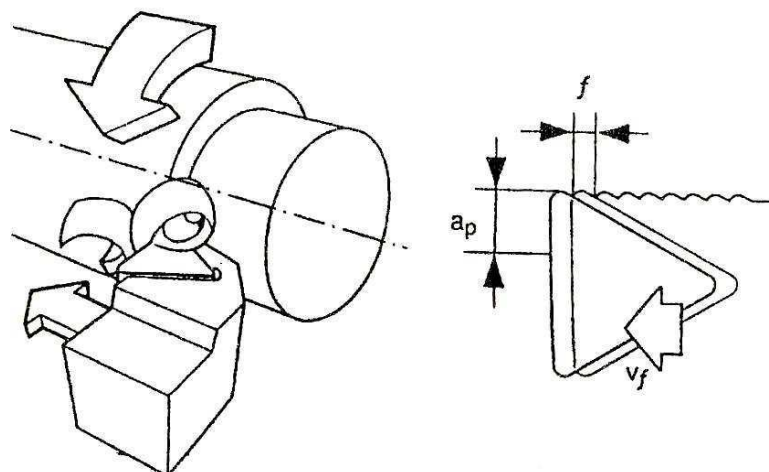
Obr. 2.15 Řezná rychlost při soustružení

Velikost optimální hodnoty řezné rychlosti závisí zejména na mechanických vlastnostech materiálu obrobku, tj. na jeho obrobitelnosti, na druhu materiálu nástroje, tj. na jeho řezivosti, na velikosti průřezu třísky, na velikosti posuvu a hloubky odebírané vrstvy materiálu a na zvolené trvanlivosti nástroje. Správná hloubka řezu a_p a posuv f jsou kritickými hodnotami pro kontrolu utváření třísky.

Velikosti posuvu při soustružení udává délka dráhy nástroje v mm za jednu otáčku obrobku (posuv podélný či příčný). Protože se při soustružení nástroj posune při jedné otáčce o hodnotu posuvu, je možné stanovit rychlost posuvu v závislosti na otáčkách vřetená:

$$v_f = f \times n \text{ [mm/min]}, \text{ kde}$$

f je posuv na otáčku a n je počet otáček



Obr. 2.16 Hloubka řezu a posuvu při soustružení

Při soustružení se velikost a tvar průřezu třísky určují velikostí posuvu, hloubkou řezu, úhlem nastavení a tvarem řezné hrany v záběru. Při výpočtu strojního času při soustružení se vychází ze vztahu:

$$t_{str} = \frac{L}{v_f} \text{ [min]}, \text{ kde}$$

L je délka strojního posuvu a v_f je tloušťka odřezávané vrstvy

Pro plochu odřezávané vrstvy platí:

$$S = a_p \times f = l_a \times h \text{ [mm}^2\text{]}, \text{ kde}$$

l_a je šířka odřezávané vrstvy, h je tloušťka odřezávané vrstvy

3 Návrh technologie pro zlepšení kvality povrchu keramických obrobků

Při návrhu technologie pro zlepšení kvality povrchu obrobku keramických materiálů musíme brát úvahu spoustu faktorů. Mezi nejdůležitější jsou samotné fyzikální a chemické vlastnosti obráběného materiálu a volba nástroje. Zde je na mysli převážně materiál nástroje a jeho geometrie. Typ nástroje máme popsán již v teoretické části, jedná se o polykrystalický diamant s povlakem CVD. Pokud máme srovnané tyto údaje, je možné již přemýšlet nad konkrétními parametry obrábění. Dále je třeba zmínit, že se budeme zabývat pouze soustružením, vybraná součást, na které budeme testovat jednotlivé parametry obrábění a jejich vliv na kvalitu povrchu má průměr $D = 150 \text{ mm}$. Jedná se o materiál SSiC Rocar S1. Tento materiál má vyšší užitnou hodnotu než materiál SiSiC, díky své vyšší teplotní a chemické odolnosti. Tento materiál je konkrétněji popsán v kapitole 2.2 a v tabulce 2.1 nalezneme základní informace o jeho charakteristických vlastnostech.

Další důležitý faktor, který hraje velkou roli je stroj, na který budeme daný experiment provádět. Jedná se o hrotový soustruh SUI 50, který je určen pro všechny soustružnické práce s vysokou produktivitou, při snadné ovladatelnosti.



Obr. 3.1 Hrotový soustruh SUI 50

Základní parametry SUI 50:

- oběžný průměr nad ložem 500 mm
- oběžný průměr nad suportem 320 mm
- výkon hlavního motoru 16 kW
- rozměry stroje (š x d x v) 1280x3155x1450 mm

- hmotnost stroje 2120 kg

Nyní máme zvolený stroj, na kterém budeme provádět daný experiment, máme obrobek, na kterém budeme zkoumat právě vliv parametrů obrábění a geometrii nástroje na jeho vlastnostech. Vlastnosti nástroje jsou popsány v kapitole 2.3. Právě z této kapitoly, konkrétně z tabulky 2.2 budeme vycházet pro volbu základních parametrů. Řezná rychlost v_c by se měla pohybovat v rozsahu 80 – 300 m/ min, hloubka řezu by měla být maximálně 2 mm. Maximální hodnota posuvu f je do 0,2 mm/ot. Doporučený rádius by měl být v rozsahu 0,4 – 1,2 mm. Tyto hodnoty jsou právě uvedeny v tabulce 2.2. Je potřeba si uvědomit, že právě tyto hodnoty jsou uvedeny pro keramické materiály, tedy pro širší rozsah a ne konkrétně pro materiál SSiC Rocar S1, proto tyto hodnoty mohou být mírně odlišné. Nyní v tabulce uvedeme hodnoty nastavení dle zkušeností pracovníků, kteří pracují s materiálem jak SSiC Rocar S1 a materiálem SiSiC Rocar SiG.

<i>Průměr kluzného kroužku [mm]</i>	<i>Otáčky sklíčidla [ot/min]</i>
cca do 100	cca 450
cca 100 - 150	cca 350
cca 150 - 200	cca 250

Tab. 3.1 Závislost průměru na otáčkách sklíčidla

<i>Posuv</i>	<i>SiSiC</i>	<i>SSiC</i>
Soustružení	max. 0,8 mm/ot	max. 0,5 mm/ot
Oddělování	max. 0,3 mm/ot	max. 0,2 mm/ot

Tab. 3.2 Maximální hodnoty posuvu pro dané materiály

Pomocí předchozího odstavce a následujících dvou tabulek, kdy v první tabulce je uvedena závislost průměru obrobku na otáčkách a ve druhé tabulce jsou hodnoty maximálního posuvu. Můžeme si všimnout dvou zásadních faktorů. Ten první je, že v praxi je daleko více známější pojem otáčky než pojem řezná rychlost. Právě řezná rychlost je daná otáčkami a průměru obrobku. Vztah pro její výpočet nalezneme v teoretické části, v základních pojmech. Nejzásadnější je možná právě fakt, že počet otáček závisí na průměru obrobku, tedy je logické, že musíme volit jiné otáčky, pokud má obrobek průměr 100 mm a nebo 500 mm. V tabulce 3.1 jsou uvedeny pouze do průměru obrobku 200 mm, jelikož právě testovaný obrobek má průměr 150 mm. Další velice zásadní je fakt, že tyto hodnoty jsou pouze orientační (jak můžeme vidět v tabulce 3.1) a jejich volba je pouze na pracovníkovi, který právě daný proces provádí.

V tabulce 3.2 nalezneme hodnoty posuvů obou materiálů. Nás zajímá převážně materiál SSiC. Hodnota maximálního posuvu je 0,5 mm/ot. Pokud tuto hodnotu porovnáme s hodnotami v tabulce 2.2, kde hodnota maximálního posuvu je 0,2 mm/ot můžeme konstatovat, že právě tyto dvě hodnoty se neliší velkým rozdílem, vzhledem k tomu, že v tabulce 2.2 jsou tyto hodnoty určeny pro širší škálu keramických materiálů.

Pokud si vypočítáme ze známého vztahu pro řeznou rychlost tuto hodnotu pro průměr obrobku 150 mm a z tabulky volíme hodnotu $n = 350$ ot:

$$v_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} = \frac{\pi \times 150 \times 350}{1000} = 164,93 \text{ m/min}$$

Dostaneme hodnotu řezné rychlosti cca 165 m/min. Opět tedy můžeme konstatovat, že se teoretické podklady shodují s praktickými, kdy teoretický podklad byl, že řezná rychlost by se měla pohybovat v rozsahu 80 – 300 m/min.

Při volbě geometrických parametrů břitu budeme vycházet z teoretického podkladu z kapitoly 3.4, která nám vysvětluje jednotlivé úhly nastavení a ukazuje nám rozmezí, ve kterém by se měl daný úhel pohybovat. Pro experiment zvolíme celkem dva nástroje z různou geometrií. První nástroj bude destička PKD a druhý nástroj bude nůž z tvrdokovu (obr.3.1), na kterém je napájena destička z PKD (výkresy obou nástrojů nalezneme v příloze, u druhého uvedeného nástroje byly změněny parametry geometrie na hodnoty uvedené v tabulce). V následujících tabulkách (tab. 3.3 a 3.4) si uvedeme základní parametry, těchto nástrojů:

<i>Geometrie</i>	<i>Symbol</i>	<i>Hodnota [°]</i>
Úhel čela	γ_0	0
Úhel hřbetu	α_0	6
Hlavní ostří	κ_r	45
Sklon ostří	λ_s	4

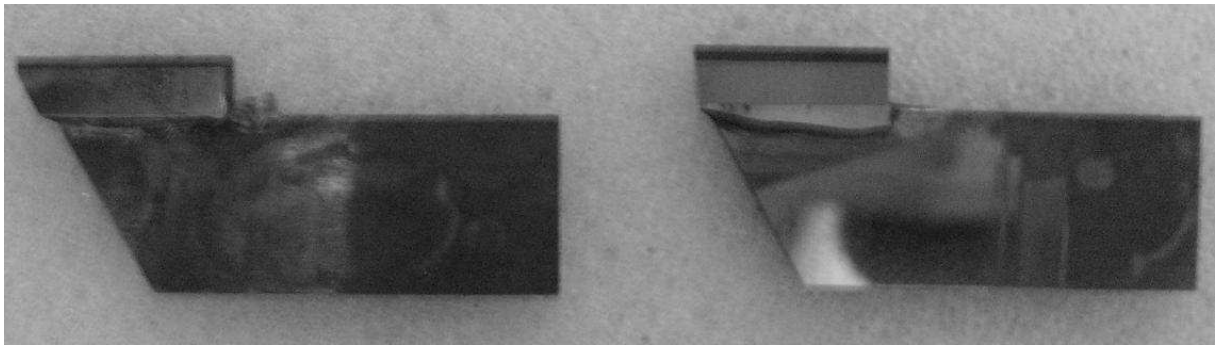
Tab. 3.3 Destička PKD

<i>Geometrie</i>	<i>Symbol</i>	<i>Hodnota [°]</i>
Úhel čela	γ_0	1
Úhel hřbetu	α_0	15
Hlavní ostří	κ_r	45
Sklon ostří	λ_s	6

Tab. 3.4 Nůž PKD

Parametry obrábění pro experiment budeme tedy volit:

<i>Řezná rychlost</i>	24 – 376 m/min
<i>Otáčky sklíčidla</i>	50 – 800 ot
<i>Hloubka řezu</i>	max. 2 mm
<i>Posuv</i>	max. 0,4 mm
<i>Rádus</i>	0,4 – 1,6 mm



Obr. 3.1 Nůž z tvrdokovu s napájenou PKD destičkou

Na obrázku 3.1 je vyobrazen nůž z tvrdokovu s napájenou PKD destičkou. Na obrázku můžeme shlédnout rozdíl mezi opotřebeným nástrojem a nástrojem novým. Opotřebený nástroj (obrázek vlevo) je charakteristický světlou skvrnou v oblasti přechodu destičky a tvrdokovu. Dále již na první pohled si můžeme všimnout rozdílu tloušťky destičky.

4 Diskuze experimentů

Ve 3. kapitole jsme se zabývali jednotlivými fakty, které je potřeba mít promyšlené a určené k provedení experimentu. K provedení experimentu máme k dispozici obrobek o průměru 150 mm, dva nástroje z různou geometrií a zvoleny parametry obrábění. Nyní budeme zjišťovat závislost velikosti posuvu na kvalitě povrchu při konstantních otáčkách, při použití obou nástrojů a ve druhém experimentu budeme zkoumat závislost velikosti řezné rychlosti na kvalitě povrchu. Pod pojmem kvalita povrchu si můžeme představit spoustu pojmů, které se mohou týkat této problematiky. Kvalitu povrchu nám určují převážně jeho správné rozměry, drsnost materiálu, fyzikální vlastnosti funkčních ploch a minimální rezidiva (minimum tlakových a tahových pnutí). Samozřejmě je potřeba si uvědomit, že ke zkoumání těchto všech parametrů je třeba nutné vybavení. V místě, kde jsme experiment prováděli se tyto vlastnosti zkoumají až po provedení kompletního procesu, tedy po broušení a různých povrchových úpravách. Keramické materiály zde procházejí kompletním procesem tedy od přípravy směsí, její vypálení až po její dokončovací úpravy. Obrábění těchto materiálů je pouze jen určitá etapa, kterým výrobek projde, je tedy pochopitelné, že pro výzkum obráběných součástí a jejich kontrolu kvality zde není prostor.

Výhodou v tomto experimentu bylo, že jsme si zvolili na doporučení odborného asistenta materiál SSiC, který je oproti materiálu SiSiC světlejší a celkově dané vady na materiálu při různých parametrech jsou lépe znatelné při vizuální kontrole.

4.1 Závislost velikosti posuvu na kvalitě povrchu materiálu

V prvním experimentu jsme zkoumali, jak se projeví velikost posuvu na kvalitě povrchu při konstantní rychlosti. Zvolili jsme při tom počet otáček na 355 ot, což odpovídá řezné rychlosti při průměru obrobku 150 mm cca 167 m/min. Tato řezná rychlost je doporučená rychlost pro obrábění při této velikosti průměru obrobku. Bylo provedeno celkem 6 měření pro každý nástroj, tedy dohromady 12 měření. V tabulce 4.1. jsou uvedeny hodnoty posuvů pro daný experiment.

č. měření	1	2	3	4	5	6
f [mm/ot]	0,295	0,235	0,21	0,181	0,09	0,05

Tab. 4.1 Hodnoty posuvů

Provedli jsme tedy celkem 6 měření, kdy maximální hodnota posuvu činila 0,295 mm/ot, tato hodnota je maximální, jelikož soustruh, na kterém jsme experiment prováděli měl maximální hodnotu posuvu 0,3 mm/ot. Naopak minimální hodnota posuvu byla 0,05 mm/ot. Po provedení experimentu můžeme konstatovat, že:

- s větší hodnotou posuvu docházelo k většímu odštípávání materiálu
- s větším posuvem byla velikost odváděné třísky větší (při posuvu 0,295 mm/ot byla tříska menší granule o velikosti cca 1 mm a při posuvu 0,025 mm/ot tříska byla ve formě velmi jemného prášku)
- s menší hodnotou posuvu byl povrch materiálu jemnější, postupně se tedy povrch obrobku zlepšoval se snižující se hodnotou posuvu

Po provedení prvních šesti měření se vyměnil nástroj za nůž s napájenou destičkou PKD a proces se opakoval. Po provedení experimentu můžeme konstatovat, že platí stejné body jako o odstavec výše. Nyní nám zbývá jen porovnat, který nástroj, měl lepší vliv na dosaženou kvalitu povrchu. Při vizuální kontrole dvou vzorků byl rozdíl znatelný pouze ve velikosti odštípávání hrany. První nástroj hranu odštípal více, druhý méně. Na obrázcích 4.1 a 4.2 můžeme vidět dané rozdíly.



Obr. 4.1 Měření č.1



Obr. 4.2 Měření č.2

Můžeme tedy konstatovat, že v této části je lepší volba nástroje 2, tedy nože s napájenou destičkou PKD, který má jiné geometrické parametry jako nástroj 1. Zároveň jak již bylo uvedeno, nejlepší vlastnosti má povrch při nejmenším posuvu, naopak nejvíce znatelné vady na povrchu jsou při maximálním zvoleném posuvu. Můžeme tedy říci, že se snižováním posuvu f se povrch materiálu obrobku zlepšoval.

4.2 Závislost velikosti řezné rychlosti na kvalitě povrchu materiálu

Ve druhém experimentu byla testována závislost řezné rychlosti na kvalitě obrobeného povrchu keramického materiálu SSiC. Hodnotu posuvu f jsme zvolili jako konstantní, tedy při průběhu měření neměnnou. Hodnota f činila 0,09 ot/mm. Zde jsme provedli celkem 7 měření, kdy nejnižší hodnota otáček činila 50 otáček a nejvyšší hodnota byla 710 otáček. Pro tento experiment jsme využili nástroj č.2, tedy nůž s napájenou destičkou PKD, který se právě v prvním měření jevil jako lepší varianta pro obrábění materiálu SSiC. V tabulce č. 4.2 jsou uvedeny hodnoty řezných rychlostí.

č.měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
$n [ot]$	50	140	280	350	450	560	710
$v_c [m/min]$	23,56	65,97	131,94	164,93	212,05	263,89	334,5

Tab. 4.2 Hodnoty otáček a řezných rychlostí pro jednotlivá měření

Z tabulky je patrné, v jakém rozsahu se řezná rychlost testovala. Vycházelo se jak z teoretických podkladů, tak z podkladů, které byly sestaveny na základě zkušeností pracovníků, kteří s tímto materiálem pracují. Právě při této velikosti průměru obrobku pracovníci volí hodnotu 355 ot, což odpovídá rychlosti 167 m/min.

Při prvním měření, kdy otáčky dosahovali hodnoty 50 ot, byly na povrchu velmi znatelné trhliny, kdy se trhal materiál a povrch byl na dotyk velice hrubý. Velikost třísky byla menší granule o velikosti cca 1,5 mm. Podobného výsledku jsme dosáhli u druhého měření, kdy se otáčky zvýšili na hodnotu 140 ot. Při této hodnotě byly vady na povrchu sice menší, než oproti prvnímu měření, ale byly viditelné na první pohled. Tříska byla menší do velikosti cca 1 mm (viz. obr. 4.3, kde můžeme vidět poškození materiálu při prvních dvou měření, z obrázku plyne, že tyto hodnoty otáček jsou při tomto posuvu pro materiál SSiC naprosto nepřijatelné). Při zvýšení počtu otáček na 280 ot již povrch dosahoval podstatně lepších parametrů, než při prvních dvou měření (viz. obr. 4.4), nejlepší hodnoty začal povrch dosahovat až při měření 4., kdy se právě volily hodnoty otáček 350 (tedy doporučené otáčky pro tento průměr, viz. obr. 4.5). Při postupném zvyšování otáček až do hodnoty 710, jsme si mohli všimnout, jak se mění tříska. Při posledních měření už byl odváděn pouze „prášek“. Až od 4. tého měření jsme si povšimnuli, že při zvyšování otáček od této hodnoty se nijak zvlášť rychlost obrábění na kvalitě povrchu neprojevovala. Od již zmiňovaného 4. měření byl povrch obrobku velice jemný, téměř bez trhin (samozřejmě posudek je vzhledem k tomu, jaké

jsme měli možnosti posuzovat kvalitu povrchu). Výsledek pátého měření můžeme vidět na obrázku 4.6, poté již do sedmého měření byly výsledky téměř totožné.



Obr. 4.3 Poškození povrchu v prvních dvou měření (ve vrchní části 1. měření, ve druhé 2. měření)



Obr. 4.4 Poškození povrchu ve třetím měření



Obr. 4.5 Poškození povrchu ve čtvrtém měření



Obr. 4.6 Poškození povrchu po pátém měření (velký detail – můžeme vidět materiál naprosto minimálně porušen)

5 Technicko – ekonomické zhodnocení

Pomocí provedení daných experimentů, které jsou diskutovány a představeny v předešlé kapitole můžeme nyní provést určitý závěr. Po prvním experimentu, kdy jsme testovali vliv velikosti posuvu na kvalitě povrchu obrobku jsme došli názoru, že kvalita povrchu obrobku se zlepšuje se snižováním velikosti posuvu. Z toho tedy vyplývá to, že čím větší hodnotu posuvu volíme, tím je kvalita povrchu obrobku nižší. Také je třeba si uvědomit, že právě se zvyšováním posuvu klesá trvanlivost břitů nástroje, tím tedy dochází k většímu opotřebení břitů nástroje. Dále se zvyšováním velikosti posuvu nám stoupá i teplota řezání, ovšem je třeba dodat, že posuv nemá takový vliv na teplotu řezání jako například řezná rychlost. Z toho všeho je patrné, že velká hodnota posuvu není nejideálnější volbou. Zároveň je třeba si uvědomit fakt, že se snižováním velikosti hodnoty posuvu se nám podstatně snižuje čas obrábění, tedy je třeba se zamyslet nad faktem, co je pro nás výhodnější, jestli jsou to menší náklady na nástroj, energetické náklady (z hlediska většího výkonu) nebo jestli je pro nás výhodnější tyto hodnoty takzvaně zanedbat a jde nám o to, aby daný výrobek byl vyroben co možná v nejkratším čase. Byly zde zmíněny energetické náklady, pokud budeme obrábět větším výkonem, ale menší dobu a nebo menším výkonem a delší dobu, je otázka k zamyšlení, co je pro nás tedy výhodnější. Nejvýhodnější by bylo, zvolit takovou optimální hodnotu, která by jednak nevyžadovala velké požadavky na výkon, na nástroj a dobu obrábění. V našem případě po provedení experimentu je nejvhodnější hodnota od 0,181 – 0,09 mm/ot. V tomto testu jsme také zkoumali, jak se projeví geometrie nástroje na dosaženou kvalitu povrchu obrobku. Lepších hodnot povrchu obrobku dosahoval nástroj číslo 2, tedy nůž s destičkou PKD. Prokázalo se při experimentu, že PKD je nevhodný pro obrábění s neutrálním úhlem čela, jelikož to mělo za následek vylamování ve směru štěpení diamantu. Další hodnotou, která má vliv na kvalitu povrchu a také na opotřebení nástroje je hloubka řezu. V obou případech těchto experimentů jsme zvolili hodnotu 1,5 mm.

Ve druhém experimentu jsme zkoumali, jaký vliv má na kvalitu povrchu obrobku řezná rychlost. Z teoretického podkladu jsme měli představu, že tato hodnota by se měla pohybovat při obrábění polykrystalickým diamantem keramického povrchu v rozsahu od 80 – 300 m/min. V tomto experimentu jsme zvolili širší rozsah a to od 26 – 376 m/min. V prvním měření jsme zvolili hodnotu 26 m/min a ve druhém hodnotu 66 m/min, tedy hodnoty, které jsou pod hranicí teoretického podkladu. Výsledky měření

byly jednoznačné. V obou případech byl závěr ten, že je naprosto nepřipustné volit tyto hodnoty řezné rychlosti. Ještě je třeba podotknout, že hodnota posuvu byla konstantní a to hodnota 0,09 mm/ot. Poměrně optimálních hodnot jsme začali dosahovat po čtvrtém měření, kdy řezná rychlost dosahovala 165 m/min. Nejlepší hodnoty kvality povrchu (vzhledem k naším možnostem zkoumání) byly dosaženy při 5. – 7. měření, kde jsme dosahovali téměř stejných výsledků. Jako hodnota pátého měření byla řezná rychlost 212 m/min, dále 264 a 335 m/min. Můžeme tedy určit závěr takový, že překonání hodnoty 165 m/min jsme dosahovali poměrně uspokojivých výsledků. Teď je třeba si opět uvědomit, jaké vedlejší účinky může způsobovat vyšší řezná rychlost. Při zvyšování řezné rychlosti bezpodmínečně stoupá i teplota řezání. Naopak je třeba také zdůraznit to, že při zvyšování řezné rychlosti klesá teplota obrobku, jelikož doba styku nástroje s obrobkem je kratší. Zároveň se zvyšováním řezné rychlosti také klesá trvanlivost břitů nástroje a také vzrůstají energetické náklady, jelikož je při vyšších otáčkách třeba vyššího výkonu stroje. Nyní je třeba opět se zamyslet, jaké jsou naše cíle. Zda je bod číslo jedna pro nás kvalita povrchu nebo například úspora energie, nástroje apod. Také je třeba si uvědomit to, že při zvýšené řezné rychlosti můžeme dosáhnout lepšího výsledku co se týče opotřebení nástroje například tím, že snížíme hloubku řezu, která v tomto testu byla opět 1,5 mm. Snížením hloubky řezu se zase zvýší časové nároky.

Samozřejmě je třeba uvažovat tak, aby byly zvoleny hodnoty, které jednak mají dobré výsledky co se týče požadavků (v našem případě kvalita povrchu) ale také je velice důležitá ekonomická stránka věci. Pokud zvolíme například parametry, kdy povrch bude nejkvalitnější (tedy hodnoty posuvu $f = 0,05$ a rychlost $v_c = 335$ m/min), musíme brát v úvahu následující fakta. Vlivem malého posuvu by se výrazně prodloužila výroba dané součásti. I když by byl minimální posuv, tedy břit nástroje by se opotřebovával nejméně, daleko větší vliv na opotřebení nástroje má řezná rychlost. Ta je v našem testu maximálně zvolená. Vlivem vysoké řezné rychlosti by stoupala řezná teplota, která má právě za následek to, že se opotřebovává více nástroj. Tedy, pokud to shrneme, za cenu nejkvalitnějšího povrchu by se zvedli výrazně energetické náklady (větší doba provádění procesu a potřeba většího výkonu), více by se opotřebovával nástroj, celková doba výroby by se zvedla. Už teď je z těchto argumentů patrné, že tudy cesta nevede, že je třeba zvolit takové optimální parametry, které by umožňovali nejen kvalitní práci, ale také méně ekonomicky náročnou. Optimální varianta je následující: Volba hodnoty posuvu (0,181 – 0,09 mm/ot), volba řezné

rychlosti 165 – 212 m/min (350 – 450 ot). Díky těmto parametrům se díky nižší řezné rychlosti a nižší hodnoty posuvu dojde ke snížení odebíraného příkonu stroje, díky nižší řezné rychlosti a nízkému posuvu se sníží opotřebení nástroje (také vlivem nižších řezných teplot) a celková doba obrábění se zmenší.

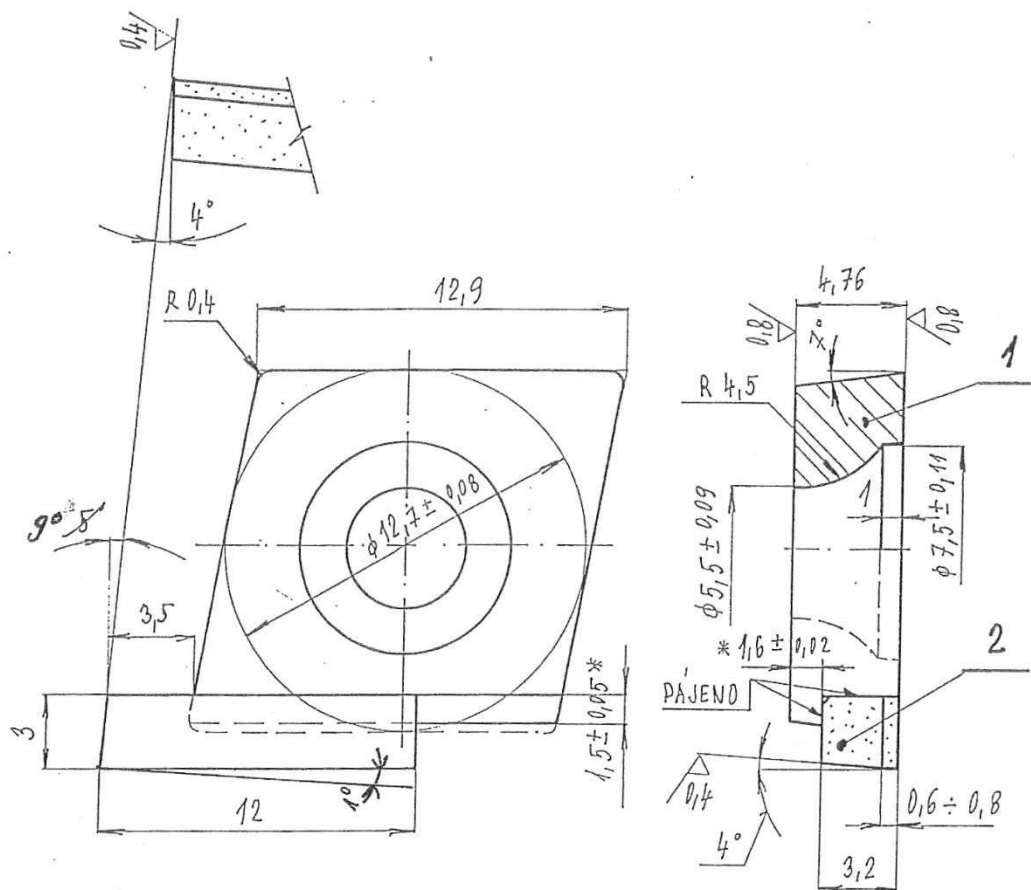
Literatura

- [1] BILÍK, O., Obrábění I, 1.Ostrava, VŠB – TU Ostrava, 2001, 136s,
ISBN 80 – 7078 – 811 – 9
- [2] MRKVICA, I.,Návody ke cvičení z obráběcích nástrojů, 2.Ostrava, VŠB – TU
Ostrava, 2008, 148s, ISBN 978 – 80 – 248 – 1053 – 9
- [3] VASILKO,K., NOVÁK–MARCINČIN,J., HAVRILA,M. Výrobné inženieerstvo.
[I] Prešov: Datapress Prešov, 2003, 424s, ISBN 80 – 7099 – 995 – 0.
- [4] NESLUŠAN,M., TUREK,S, BRYCHTA,J., ČEP,R., TABAČEK,M.
Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní. [I] Žilina: EDIS Žilina, 2007,
343s, ISBN 978 – 80 – 8070 – 711 – 8.
- [5] MÁDL,Jan a kol., Technologie obrábění a montáže – návody ke cvičení, Praha –
ČVUT, 1990, 86s.
- [6] BRYCHTA, J., HAVRILA, M., JURKO, J., ZAJAC, J. Top trendy v obrábaní, I.
část – Obrábané materiály. Žilina: Media/ST, s.r.o., Žilina, 2006, 193s, ISBN:
80- 968954 – 2 – 7
- [7] ZAJAC,J., JURKO,J., ČEP,R. Top trendy v obrábaní, II. část – Nástrojové
materiály. [I] Žilina: Media/ST, s.r.o., Žilina 2006, 193s,
ISBN 80 – 968954 – 2 – 7
- [8] VASILKO,K., HAVRILA,M.,MARCINČIN NOVÁK,J., MÁDL,J. Top trendy
v obrábaní, III. část – Technologie obrábaní. [I] Žilina: Media/ST, s.r.o., Žilina,
2006, 214s, ISBN: 80 – 968954 – 2 – 7
- [9] Podklady z firmy CeramTec Czech Republic s.r.o

Seznam příloh

PŘÍLOHA 1

✓ (0,8 / 0,4)

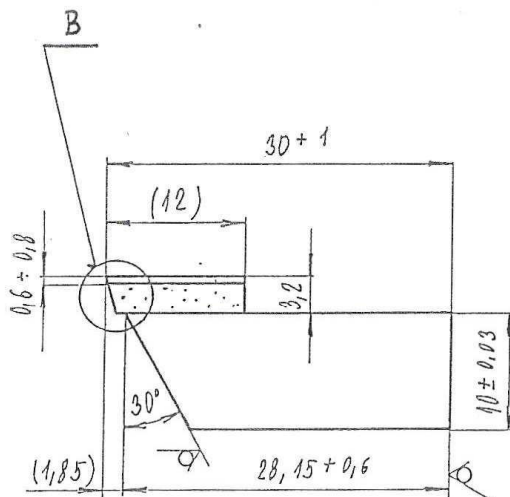


POZNÁMKA: * ROZMĚRY $1,6 \pm 0,02$ A $1,5 \pm 0,05$ JSOU PRO BROUŠENÍ DSAZENÍ

2		1	PLÁTEK	12 x 3 x 3	PKD - 50		
1	205 384 813 021	1	DESTIČKA	CCMX 12 04 04	GJ 11-84		
Por. č.	Číslo výkresu	Kusů	Název	Rozměry materiálu čís. rozměrová normy	Materiál	Třída od- padu	Čistá váha 1 ks v kg
Por. č.	Čís. výkr. sest.	Por. č.	Čís. výkr. sest.	Por. č.	Čís. výkr. sest.	Por. č.	Čís. výkr. sest.
						Celk. čistá váha v kg.	
Měřítka	Kreslil	Norm. ref.					
	Přezkoušel	Výr. ref.					
	Schválil	Datum	15. 8. 1996				
Typ CER PRAM - TYP 5 - PRAVA							
Název							
Starý výkres			Nový výkres				
206 952 284 005 50							

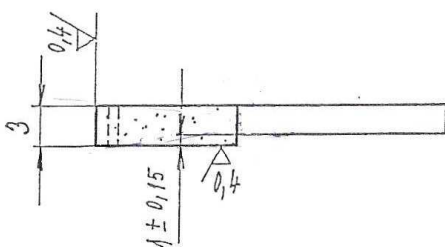
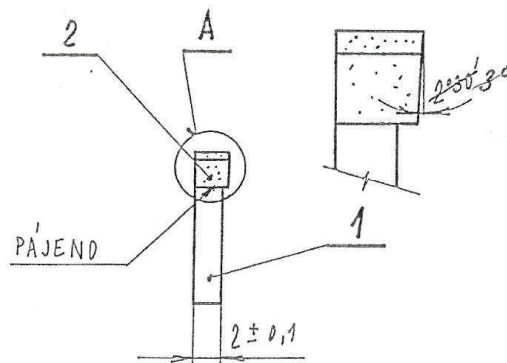
PŘÍLOHA 2

0,8 / 0,4 / 0,1



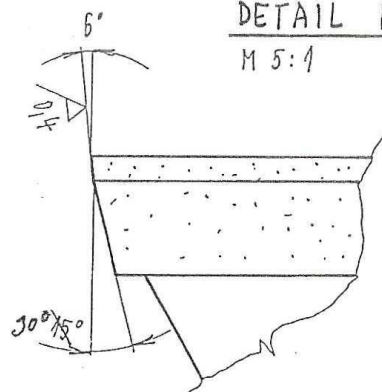
DETAIL A

M 5:1



DETAIL B

M 5:1



2		1	PLÁTEK	12 x 3 x 3	PKD - 50			
1	205 384 825 072	1	TĚLESO	28,15 x 10 x 2	GJ 11 - 84			
Poř. č.	Číslo výkresu	Kusů	Název	Rozměry materiálu čís. rozměrové normy	Materiál	Třída od- pedu	Čistá váha 1 ks v kg	Poznámka
Poř. č.	Čís. výkr. sest.	Poř. č.	Čís. výkr. sest.	Poř. č.	Čís. výkr. sest.	Poř. č.	Čís. výkr. sest.	Čistá váha v kg
Měřítka	Kreslil	Norm. ref.						
2:1	Přezkoušel	Výr. ref.						
5:1	Schválil	Datum	15.8.1996	Změna				
Typ CER PRAM - TYP 2								
Název			Starý výkres			Nový výkres		
ov NUZ			206 952 285 010 50					



PRAMET
akciová společnost
ŠUMPERK